

# **Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol**

---

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil**

**Área de concentração: Construção Civil  
Sub-área de concentração: Conforto Ambiental**

---

**Catharina Cavalcante de Macêdo**

**Orientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.**

**Florianópolis 2002**

# Folha de Aprovação

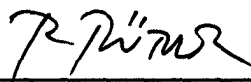
**Dissertação defendida e aprovada em 06/06/2002,  
pela comissão examinadora**



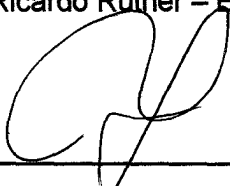
Prof. PhD. Fernando Oscar R. Pereira – Orientador Moderador



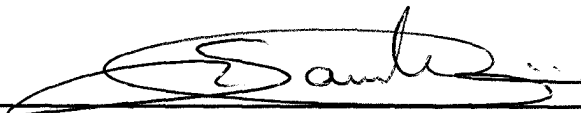
Prof. Dr. Paulo Sergio Scarazzato – Examinador externo



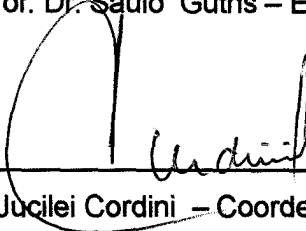
Prof. Dr. Ricardo Rüther – Examinador



Prof. PhD. Roberto Lamberts – Examinador



Prof. Dr. Saulo Güths – Examinador



Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do CPGEC

MACEDO, Catharina C. ***Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol.*** Florianópolis, 2002. 135p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil)- Curso de Pós -Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Fernando Oscar R. Pereira.

Defesa: 06/06/2002

# Agradecimentos

Aos meus pais, Jackson e Rita e aos meus irmãos, Eduardo, Ana Cecília, por terem sempre me compreendido, me incentivado e me apoiado em todas as minhas decisões.

Ao Professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira, por sua orientação em todos os passos do curso e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, que através dos seus coordenadores e secretaria fornecem constante apoio e disponibilidade para obter recursos, materiais e equipamentos necessários ao bom andamento do curso.

Ao Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON) do Departamento de Arquitetura pelo fornecimento de equipamentos, materiais e espaço físico essenciais para a elaboração deste trabalho.

Aos alunos bolsistas do LABCON Marcel Matias Pontes e Veridiana Atanázio, pela participação nas medições luminosas.

Ao Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais (LMPT) do Departamento de Engenharia Mecânica pelo espaço físico, empréstimo e produção de equipamentos essenciais ao desenvolvimento do Radiômetro de Abertura e realização das medições térmicas.

Ao Professor Saulo Güths pela sua disponibilidade e grande participação no desenvolvimento de Radiômetro de abertura.

Aos alunos bolsistas do LMPT Anderson Maccarini Coral e Marcel Gava da Silva, pela colaboração no desenvolvimento do Radiômetro de Abertura e participação nas medições térmicas.

Ao Laboratório de Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica, por ter cedido o espaço para a realização da parte experimental do trabalho.

Ao Laboratório de Eficiência Energética na Engenharia em Edificações (LabEEE) por ter permitido o uso do espaço físico e de computadores durante todo o curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq por seu programa de fornecimento e financiamento de bolsas de estudo que auxiliam a formação de alunos nos cursos de pós-graduação.

Ao Professor Leonardo Bittencourt pelos conselhos e por ter despertado o meu interesse pela pesquisa.

As minhas amigas e amigos Juliana, Lúcia Helena, Helder, Karyne, Roseline, Ana Vitória, Roberta, Helen, Alexandra, Joyce, César, Daniel e Marcel, pelo companheirismo, incentivo e por estarem sempre do meu lado em todos os momentos.

# Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUÇÃO.....	01
COLOCAÇÃO DO PROBLEMA.....	01
1.2 OBJETIVO.....	03
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	03
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	03
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	04
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 INTRODUÇÃO.....	05
2.2 HISTÓRICO.....	05
2.3 FONTES DE LUZ NATURAL.....	07
2.3.1 FONTES DE LUZ DIRETA.....	07
2.3.1.1 Luz do Sol.....	07
2.3.1.2 Luz do Céu.....	08
2.3.2 FONTES DE LUZ INDIRETA.....	08
2.4 MECANISMOS DE CONTROLE DA LUZ.....	09
2.4.1 REFLEXÃO.....	09
2.4.2 TRANSMISSÃO.....	10
2.4.3 REFRAÇÃO.....	10
2.5 SISTEMAS DE ABERTURAS.....	11
2.5.1 REFERENCIAL HISTÓRICO.....	11
2.5.2 FUNÇÃO DAS ABERTURAS.....	11
2.5.2.1 Vista.....	12
2.5.2.2 Ventilação.....	13
2.5.2.3 Luz Natural.....	13
2.5.2.4 Luz do Sol.....	14
2.5.3 DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO DAS ABERTURAS.....	16
2.6 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL QUE UTILIZAM A LUZ DIRETA DO SOL.....	20
2.6.1 SISTEMAS ATIVOS.....	20
2.6.1.1 Dutos de Luz.....	20
2.6.1.1.1 Sistema de Coleta da Luz.....	21

2.6.1.1.2 Sistema de Transmissão e Distribuição da Luz.....	23
2.6.1.1.3 Sistema de Emissão da Luz.....	24
<b>2.6.1.2 Sistema de Prismas Motorizados.....</b>	<b>25</b>
<b>2.6.1.3 Venezianas com Rastreamento Solar.....</b>	<b>26</b>
<b>2.6.1.4 Valra.....</b>	<b>26</b>
<b>2.6.2 SISTEMAS PASSIVOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6.2.1 Sistemas com Refletores de Luz.....</b>	<b>27</b>
2.6.2.1.1 Prateleira de Luz.....	27
2.6.2.1.2 Sistemas de Iluminação Zenital com Refletores de Luz.....	27
<b>2.6.2.2 Sistemas de Refração da Luz.....</b>	<b>28</b>
2.6.2.2.1 Sistemas Prismáticos.....	28
2.6.2.2.1.1 Painéis Prismáticos que Redirecionam a Luz Direta do Sol.....	29
2.6.2.2.1.2 Painéis Prismáticos que Excluem a Luz Direta do Sol.....	29
2.6.2.2.2 Painéis Cortados a Laser (PCL) .....	30
2.6.2.2.2.1 Abertura Lateral com PCL.....	31
2.6.2.2.2.2 Abertura Zenital com PCL.....	31
2.6.2.2.3 Sistema de Reflexão Interna Total.....	32
<b>2.6.2.3 Sistemas Espelhados.....</b>	<b>32</b>
2.6.2.3.1 Venezianas Espelhadas.....	32
2.6.2.3.2 Prateleira de Luz curvada e Revestida com Película Reflexiva.....	33
2.6.2.3.3 Parapeitos e Conchas Reflexivas .....	34
2.6.2.3.4 Forro Iluminante .....	34
2.6.2.3.5 Abertura Zenital com Duto de Luz.....	34
<b>2.6.2.4 Sistemas de Lentes.....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.2.5 Elementos Halográficos.....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.2.6 Fibra Ótica.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6.3 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO PARA SISTEMAS QUE UTILIZAM A LUZ DIRETA DO SOL.....</b>	<b>37</b>
<b>2.7 RESFRIAMENTO PASSIVO NO NORDESTE DO BRASIL.....</b>	<b>38</b>
<b>2.8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL A SEREM ANALISADOS.....</b>	<b>41</b>
3.2.1 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	43
3.2.2 SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	44
<b>3.3 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO TÉRMICA E LUMINOSA.....</b>	<b>46</b>

3.3.1 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA NO AMBIENTE INTERNO.....	46
3.3.1.1 Modelos Reduzidos para Medição da Luz Natural.....	48
3.3.1.1.1 Descrição dos Modelos em Escala.....	48
3.3.1.1.2 Localização dos Modelos e Orientação das Aberturas.....	57
3.3.1.2 Medição dos Níveis de Iluminação.....	58
3.3.1.2.1 Fotocélulas.....	59
3.3.1.2.2 Datalogger Li-250 Light Meter da Li-cor.....	59
3.3.1.2.3 Fontes de Erro.....	60
3.3.2 METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR QUE ATRAVESSA OS SISTEMAS DE ABERTURA.....	61
3.3.2.1 Desenvolvimento do Radiômetro de Abertura.....	64
3.3.2.1.1 Descrição dos Transdutores de Fluxo de Calor.....	68
3.4 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO.....	76
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
4 RESULTADOS.....	81
4.1 INTRODUÇÃO.....	81
4.2 DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURAS.....	81
4.2.1 DESEMPENHO LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURA.....	82
4.2.1.1 Transmitância da Luz Através dos Sistemas de Abertura.....	88
4.2.1.2 Distribuição de Luz Natural.....	93
4.2.1.3 Comportamento dos Sistemas Frente a Variação da Iluminância Externa e Ângulos de Incidência da Radiação Solar.....	97
4.2.2 DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE ABERTURA.....	111
4.2.3 SÍNTESE FINAL E DIRETRIZES DE PROJETO.....	117
4.4 CONCLUSÃO.....	123
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
5.1 INTRODUÇÃO.....	124
5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO.....	124
5.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	129
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
5.4. CONCLUSÃO.....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

3.3.1 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA NO AMBIENTE INTERNO.....	46
3.3.1.1 Modelos Reduzidos para Medição da Luz Natural.....	48
3.3.1.1.1 Descrição dos Modelos em Escala.....	48
3.3.1.1.2 Localização dos Modelos e Orientação das Aberturas.....	57
3.3.1.2 Medição dos Níveis de Iluminação.....	58
3.3.1.2.1 Fotocélulas .....	59
3.3.1.2.2 Datalogger Li-250 Light Meter da Li-cor.....	59
3.3.1.2.3 Fontes de Erro.....	60
3.3.2 METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR QUE ATRAVESSA OS SISTEMAS DE ABERTURA.....	61
3.3.2.1 Desenvolvimento do Radiômetro de Abertura.....	64
3.3.2.1.1 Descrição dos Transdutores de Fluxo de Calor.....	68
3.4 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO.....	76
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
4 RESULTADOS.....	81
4.1 INTRODUÇÃO.....	81
4.2 DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURAS.....	81
4.2.1 DESEMPENHO LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURA.....	82
4.2.1.1 Transmissão da Luz Através dos Sistemas de Abertura.....	88
4.2.1.2 Distribuição de Luz Natural.....	93
4.2.1.3 Comportamento dos Sistemas Frente a Variação da Iluminância Externa e Ângulos de Incidência da Radiação Solar.....	97
4.2.2 DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE ABERTURA.....	111
4.2.3 SÍNTESE FINAL E DIRETRIZES DE PROJETO.....	117
4.4 CONCLUSÃO .....	123
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
5.1 INTRODUÇÃO.....	124
5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO.....	124
5.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	129
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
5.4. CONCLUSÃO.....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131



# Lista de Figuras

01	Grande pirâmide de Queóps.....	05
02	Esquemas ilustrativos de reflexão difusa e especular.....	09
03	Esquemas de superfícies com transmissão difusa e especular .....	10
04	Fenômeno de refração da luz ao passar por um prisma.....	10
05	Vista interna da Notre Dame de Le Corbusier.....	11
06	Casa Schöder de Rietveld (linguagem neoclássica) .....	11
07	Porção do espectro da radiação solar correspondente a luz.....	15
08		
09	Esquemas de funcionamento do heliostato – redirecionando a luz para um duto.....	22
10	Esquema de funcionamento do heliostato – redirecionando a luz para um sistema de iluminação zenital.....	22
11	Coletores de luz com rastreamento solar – heliostato.....	23
12		
13	Luz captada através do heliostato, mostrado na figura 10, sendo -introduzida no ambiente interno.....	23
14	Esquema de funcionamento de um duto de luz.....	23
15	Variantes do sistema de redirecionamento de luz.....	24
16	Luminária solar com lente côncava, iluminando o ambiente de forma difusa e indireta, através do uso de um espelho côncavo.....	25
17	Luminária solar com lente côncava, iluminando o ambiente de forma difusa e direta, através do uso de lentes lineares.....	25
18	Esquemas ilustram o melhoramento da distribuição da luz no ambiente interno com a utilização do So- light.....	25
19	Espaços internos iluminados naturalmente através do So-light.....	25
20		
21	Domo transparente filtra a radiação solar deixando penetrar no ambiente apenas a luz visível.....	26
22	Esquema mostra os elementos que compõe o So-Light.....	26
23	Esquema de funcionamento do VALRA.....	26
24	Esquema ilustrativo de funcionamento de uma prateleira de Luz.....	27
25	Ilustram a melhora da distribuição da luz no ambiente interno, diante da implantação de uma prateleira de luz.....	27
26		
27		
28	Ilustram um sistema de iluminação zenital com refletores de luz.....	28
29		
30	Painel prismático.....	29
31	Esquema de redirecionamento da luz, realizado por um prisma.....	29
32	Esquema ilustrativo de funcionamento de um sistema constituído por painéis prismáticos que excluem a luz direta do sol.....	30

33	Implantação de painéis cortados a laser em aberturas laterais .....	30
34		
35	Painel cortado a laser, montado na forma de basculante.....	31
36	Painel cortado a laser, colocado em uma janela alta.....	31
37	Foto do sistema zenital, formado de 4 painéis cortados a laser, em forma de pirâmide .....	31
38	Esquema do redirecionamento da luz de acordo com a altura solar.....	31
39	Elementos sólidos montados para formar um painel, com simulação dos raios de luz do sol.....	32
40	Deflexão da luz solar através de venezianas espelhadas.....	33
41	Venezianas externas de seção triangular.....	33
42	Prateleira de luz curvada com revestida com película reflexiva .....	34
43	Detalhe da prateleira de luz.....	34
44	Esquema de um forro iluminante com luminária solar.....	34
45	Esquema do sistema zenital formado por um cilindro espelhado.....	35
46	Performance luminosa de diferentes películas HOEs, sob incidência sol em ângulos variados.....	36
47		
48		
49		
50	Fotos de faixas de luz conduzidos através de fibras óticas.....	36
51		
52		
53	Organograma de caracterização os sistemas de iluminação natural, segundo Backer (1993).....	43
54	Dimensões da maquete.....	49
55	Dimensões das aberturas zenital e lateral das maquetes.....	49
56		
57	Planta baixa localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura lateral.....	50
58	Corte esquemático localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura lateral.....	50
59	Planta baixa localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura zenital.....	50
60	Corte esquemático localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura zenital.....	51
61		
62	As fotos ilustram a localização dos pontos internos de medição.....	51
63	Transferidor de ângulos indicando ângulo desejado para o sombreamento.....	52
64	Carta Solar com a área pintada indicando o período e a hora do ano em que a prateleira de luz sombreará o ambiente interno.....	52
65	Corte mostra a definição das dimensões da prateleira de luz espelhada a partir do ângulo de 30°, indicado no transferidor de ângulos e na carta solar.....	52

66	Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com prateleira de luz espelhada.....	53
67	Foto da maquete com a prateleira de luz espelhada .....	53
68	Transferidor de ângulos indicando ângulo desejado para o sombreamento.....	53
69	Carta Solar com a área pintada indicando o período e a hora do ano em que veneziana sombreará o ambiente interno.....	53
70	O corte mostra a definição das dimensões da veneziana a partir do ângulo (30°) indicado no transferidor de ângulos e na carta solar.....	54
71	Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com veneziana.....	54
72	Foto da maquete com a veneziana espelhada.....	54
73	Foto do painel cortado a laser enviado por Ian R. Edmonds.....	55
74	Corte indicando a localização do painel cortado a laser.....	55
75	Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com o painel cortado a laser..	55
76	Foto da maquete com painel cortado a laser.....	55
77	Ilustração que auxilia nos procedimentos de desenho.....	56
78	Corte indicando a definição das dimensões do sistema zenital com seleção angular, realizada a partir dos procedimentos de desenho indicados por Moore (1991) .....	56
79	Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura zenital com um sistema de seleção angular.....	57
80	Foto da maquete com sistema zenital com de seleção Angular .....	57
81	Localização do prédio de Engenharia Mecânica B no Campus da UFSC.....	57
82	Foto da cobertura do prédio de Engenharia Mecânica da UFSC.....	58
83	Foto com lente olho de peixe ilustrando a obstrução do entorno do local onde serão realizadas as medições térmica e luminosas.....	58
84	Foto do entorno Norte.....	58
85	Obstruções vistas da maquete.....	58
86	Foto de uma fotocélula com conecto BNC.....	59
87	Foto de um Piranômetro conectado a um medidor de leitura instantânea da LI-COR.....	59
88	Foto das fotocélulas e do piranômetro com o datalogger.....	60
89	Radiômetro de abertura desenvolvido por Pereira em sua tese de doutorado.....	63
90	Desenho esquemático do primeiro protótipo do Radiômetro de Abertura.....	64
91	Projeto do Radiômetro de Aberturas.....	64
92	Fabricação e montagem do primeiro protótipo do Radiômetro de Abertura na UFSC.....	65
93	Vista frontal da bancada em operação.....	65
94	Vista posterior da bancada em operação.....	65
95	Desempenho da bancada .....	66
96	Esquema indicando a composição do Radiômetro de Abertura.....	68
97	Configuração final do transdutor do Radiômetro de Abertura desenvolvido na UFSC.....	68
98		
99	Princípio de medição do fluxo de calor.....	69
100	Corte transversal de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.....	69

101	Vista aberta do transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.....	69
102	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 1 .....	70
103	Área x sinal do fluxo do fluxímetro2.....	70
104	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 3.....	71
105	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 4.....	71
106	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 5.....	71
107	Sistema de calibração utilizando o Método do Transdutor Auxiliar.....	71
108	Montagem do Radiômetro de abertura para a calibração dos transdutores de fluxo de calor .....	73
109	Medições dos ganhos térmicos registrados pelos dois transdutores de fluxo de calor e pelo Piranômetro, sob condições de céu claro.....	74
110	Fator Solar do vidro simples com céu claro, sob incidência normal de radiação solar.....	74
111	Medições dos ganhos térmicos registrados pelos dois transdutores de fluxo de calor e pelo Piranômetro, sob condições de céu claro.....	75
112	Fator Solar do vidro simples com céu claro, sob incidência normal de radiação solar.....	75
113	Foto da prateleira de luz.....	77
114	Foto da veneziana espelhada .....	77
115	Foto do painel cortado a laser.....	77
116	Foto do sistema zenital com seleção angular.....	77
117	Formação 1 do Radiômetro.....	79
118	Formação 2 do Radiômetro.....	79
119	Formação 3 do Radiômetro.....	80
120	Formação 4 do Radiômetro.....	80
121	Valores médios de iluminância horizontal interna (lux), de cada maquete analisada, no dia 10/10/2001.....	83
122	Valores médios de iluminância horizontal interna (lux), de cada maquete analisada, no dia 11/10/2001.....	83
123	Valores médios de iluminância horizontal interna (ux), de cada maquete analisada, no dia 11/10/2001.....	83
124	Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com prateleira de luz espelhada e com vidro simples - céu claro.....	84
125	Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com veneziana e com vidro simples - céu claro.....	85
126	Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com PCL e com vidro simples - céu claro.....	85
127	Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas zenitais com vidro simples e com sistema de seleção angular - céu claro.....	85
128	Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas zenitais com vidro simples e com sistema de seleção angular - céu encoberto.....	87
129	Valores médios de iluminância horizontal interna de todos os sistemas de iluminação natural, analisados - céu claro.....	88
130	Valores médios de iluminância horizontal interna de todos os sistemas de iluminação natural	

analisados- céu encoberto.....	90
131 Redução (%) do nível de iluminância interna proporcionado pelas aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, veneziana, PCL, com relação à abertura lateral com vidro simples e pela abertura zenital com sistema de seleção angular, com relação à abertura zenital com vidro simples, nos quatro horários de medição - céu claro e encoberto.....	91
132 Índices de uniformidade para cada sistema- céu claro.....	94
133 Índices de uniformidade para cada sistema, em cada período de medição - céu encoberto.....	95
134 Distribuição da luz nos modelos em escala. Medições realizadas das 9 às 10 h - céu claro.....	97
135 Distribuição da luz nos modelos em escala. Medições realizadas das 11 às 12 h - céu claro.....	98
136 Distribuição da luz nos modelos em escala. Medições realizadas das 13 às 14 h - céu claro.....	98
137 Distribuição da luz nos modelos em escala. Medições realizadas das 15 às 16 h - céu claro.....	99
138 Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.....	101
139 Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.....	101
140 Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 9 às 10 h, céu claro.....	101
141 Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 11 às 12 h, céu claro.....	101
142 Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.....	101
143 Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.....	101
144 Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 13 às 14 h, céu claro.....	101
145 Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 15 às 16 h, céu claro.....	101
146 Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.....	102
147 Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.....	102
148 Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada- 9 às 10 h, céu claro.....	102
149 Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada- 11 às 12 h, céu claro.....	102
150 Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.....	102
151 Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.....	102
152 Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada- 13 às 14 h, céu claro.....	103
153 Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada- 15 às 16 h, céu claro.....	103
154 Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.....	104
155 Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.....	104
156 Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 9 às 10 h, céu claro.....	104
157 Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 11 às 12 h, céu claro.....	104
158 Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.....	104
159 Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - período das 15 às 16 h.....	104
160 Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 13 às 14 h, céu claro.....	104
161 Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 15 às 16 h, céu claro.....	104
162 PCL - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.....	106
163 PCL - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.....	106
164 Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 9 às 10 h, céu claro.....	106
165 Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 11 às 12 h, céu claro.....	106
166 PCL - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.....	106
167 PCL - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.....	106

168	Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 13 às 14 h, céu claro.....	106
169	Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 15 às 16 h, céu claro.....	106
170	Redirecionamento da radiação solar proporcionado pelo PCL.....	107
171	Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta- 9 às 10 h.....	108
172	Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta- 11 às 12 h.....	108
173	Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 9 às 10 h, céu claro.....	108
174	Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 11 às 12 h, céu claro....	108
175	Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta- 13 às 14 h.....	109
176	Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta- 15 às 16 h.....	109
177	Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples- 13 às 14 h, céu claro....	109
178	Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 15 às 16 h, céu claro....	109
179	Abertura zenital com sistema de seleção angular- incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h....	110
180	Abertura zenital com sistema de seleção angular- incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h..	110
181	Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular - 9 às 10 h, céu claro.....	110
182	Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com sistema de seleção angular - 11 às 12 h, céu claro.....	110
183	Abertura zenital com sistema de seleção angular- incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h..	110
184	Abertura zenital com sistema de seleção angular- Incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h..	110
185	Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular – 13 às 14 h, céu claro.....	110
186	Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular - 15 às 16 h, céu claro.....	110
187	Fatores Solares de cada sistema de iluminação natural no dia 05/11/2001.....	112
188	Fatores Solares de cada sistema de iluminação natural no dia 06/11/2001.....	112
189	Fatores Solares de cada sistemas de iluminação natural no dia 07/11/2001 .....	112
190	Média dos Fatores Solar dos sistemas analisados, dos três dias de medição.....	114
191	Fatores Solares de acordo com os ângulos de incidência solar na horizontal.....	115
192	Fatores Solares de acordo com os ângulos de incidência solar na horizontal.....	115
193	Fatores Solares dos sistemas analisados.....	116

# Lista de Tabelas

1	Resume as informações dadas por Loveland & Brown, (1987) .....	46
2	Caracterização dos sistemas de iluminação natural selecionados .....	47
3	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 1 .....	70
4	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 2 .....	70
5	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 3 .....	71
6	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 4 .....	71
7	Área x sinal do fluxo do fluxímetro 5 .....	71
8	Constantes dos cinco transdutores de fluxo de calor .....	72
9	Constantes dos cinco transdutores de fluxo de calor .....	73
10	Configuração dos sistemas de iluminação natural nas maquetes para as medições de iluminância	78
11	Configuração das aberturas do Radiômetro para as medições térmicas .....	79
12	Menores variações dos valores de iluminância média horizontal interna encontrada em dois dias de medições (sublinhados) .....	86
13	Valores médios de iluminância horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu claro .....	88
14	Redução em porcentagem do nível de iluminância interna com relação aos sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu claro .....	89
15	Valores médios de iluminância horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu encoberto .....	90
16	Redução em porcentagem do nível de iluminância interna com relação a sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu encoberto .....	91
17	Índices de uniformidade (Iluminância máx./ Iluminância mín.), calculados para cada sistema, em cada período de medição, sob condição de céu claro. ....	94
18	Reduções em porcentagem do índice de uniformidade, sob condição de céu claro. Foram tomados como referência os sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples .....	95
19	Índices de uniformidade, calculados para cada sistema, em cada período de medição, sob condição de céu encoberto .....	96
20	Redução, em porcentagem, da uniformidade com relação aos sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu encoberto .....	96
21	Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 148 .....	97
22	Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 149 .....	98
23	Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 150 .....	98
24	Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 151 .....	99
25	Variação do nível de iluminância interna proporcionado por cada sistema durante o dia .....	99
26	Altura solar e azimute nos horários das medições luminosas .....	100
27	Altura solar e azimute nos dias das medições térmicas .....	111

28	Menores variações dos valores de iluminância média horizontal interna, encontrada em dois dias de medições (sublinhados).....	113
29	Fatores Solar dos sistemas de iluminação natural nos quatro horários de medição.....	113
30	Redução em porcentagem do Fator Solar das abertura laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e com PCL com relação à abertura lateral com vidro simples e da abertura zenital com sistema de seleção angular com relação à abertura zenital com vidro simples.....	117
31	Valores do SSLE* para cada sistema de iluminação natural estudado, retirando os horários onde ocorreram a maior incidência de radiação solar direta no sensor.....	118
32	Critério de avaliação da iluminância média interna proporcionada por cada sistema de abertura analisado.....	119
33	Critério de avaliação da distribuição de luz natural proporcionada por cada sistema de abertura analisado.....	119
34	Critério de avaliação da admissão de calor proporcionada por sistema de abertura analisado.....	117
35	Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com vidro simples.....	119
36	Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com prateleira de luz espelhada	119
37	Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com veneziana.....	119
38	Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com PCL.....	120
39	Avaliação do desempenho térmico e luminoso do sistema de abertura zenital com vidro simples..	120
40	Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura zenital com sistema de seleção angular.....	120
41	Avaliação dos sistemas de iluminação natural analisados, com os conceitos que prevaleceram em cada item analisado.....	120
42	Iluminância média horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu claro.....	126
43	Iluminância média horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu encoberto.....	126
44	Média dos valores de Fator Solar dos sistemas de iluminação natural, encontrados nos três dias e nos quatro horários de medição.....	126
45	Valores do SSLE* para cada sistema de iluminação natural estudado, retirando os horários onde ocorreram a maior incidência de radiação solar direta no sensor.....	126



# Resumo

---

Apesar de muitos pesquisadores divulgarem e incentivarem a implantação de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol como uma técnica em potencial para a conservação de energia, que proporciona iluminação interna mais uniforme e luz natural em locais sem direto acesso a janelas, ainda são poucos os estudos a respeito do ganho térmico proporcionado por estes sistemas.

O trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural, que utilizam a luz direta do sol, a fim de se verificar a sua adequação a uma dada latitude ou condição climática.

Foram analisados térmica e luminosamente seis sistemas de iluminação: abertura lateral com vidro simples (3 mm); abertura lateral com prateleira de luz espelhada e vidro simples (3 mm); abertura lateral com veneziana fixa e vidro simples (3 mm); abertura lateral com painel cortado a laser; abertura zenital com vidro simples (3 mm) e abertura zenital com sistema de seleção angular e vidro simples (3 mm).

A metodologia utilizada consiste em uma investigação experimental, através de modelos em escala e sob condições de céu reais. O experimento foi dividido em dois grupos de medições:

- 1- medições dos níveis de iluminância, através de fotocélulas nos modelos em escala reduzida;
- 2- medições do fluxo de calor, que atravessa os mesmos sistemas inseridos na maquete, através do uso do Radiômetro de Abertura.

Para a determinação dos níveis de iluminância horizontal, foram utilizadas seis maquetes com ambientes idênticos, nas quais variam apenas o tipo de abertura e de sistema de iluminação natural. Em seguida, foram realizadas medições do fluxo de calor transmitido através das aberturas do Radiômetro, configuradas com os mesmos sistemas utilizados para as medições de iluminância.

Simultaneamente à aquisição dos dados através do fluxímetro, um piranômetro mediu a incidência de radiação solar direta na abertura em  $W/m^2$ , para a determinação do Fator Solar (FS) do sistema de iluminação natural.

Ao final do experimento foram realizadas análises do desempenho térmico (Fator Solar) e luminoso (distribuição e quantificação da iluminância interna) dos sistemas de iluminação natural mencionados.

A partir das análises, foi comprovado que, quando bem dimensionados, os sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol podem filtrar a radiação solar, proporcionando iluminação com níveis de iluminância adequado, distribuição da luz mais uniforme e ganhos térmicos reduzidos. Essa afirmação comprova a hipótese de que o sol pode apresentar-se como uma fonte de luz suplementar, principalmente para regiões de baixa latitude onde o conflito entre a luz e o calor é mais intenso, caso seja controlado e introduzido em pequenas quantidades, suficientes para a iluminação natural.

**Palavras Chave: Iluminação Natural; Sistemas de Iluminação Natural; Luz x Calor e Controle da Radiação Solar.**

# ABSTRACT

---

Many researchers publish and incentive the use of direct beam sunlight systems as a technique which has a big potential to conserve electric energy. However, there are not many studies about the thermal properties of these systems.

Thus, the main aim of this work is to analyze the luminous and thermal performance of six direct beam sunlight systems: lateral window with simple glass, lateral window with light shelf and simple glass, lateral window with venetian and simple glass, lateral window with laser cut panel, zenital window with simple glass and zenital window with selective angular system and simple glass.

The methodology used consist of an experimental investigation with scale models in real sky conditions. The experiment was divided into two parts:

- 1- iluminance levels measurement to make use of luminous sensor and scale models;
- 2- heat flux measurement to make use of window Radiometer.

In the iluminance levels measurement was used six scale models with similar aspects, only changing the kind of window and daylight device. After this measurement, it was done the heat flux measurement transmitted through Radiometer Window. The Radiometer windows were made up with the same systems used in the luminous measurement.

Alongside the thermal measurement, one piranometer measured the direct solar radiation incident in the window of the Radiometer. This measurement is fundamental to determine the Solar Heat Gain Factor (SHGF) of each daylight system.

At the end of the experiment, it was done thermal (SHGF) and luminous (distribution and internal iluminance quantification) analyses of each daylight system mentioned.

The analyses proved that: if the design of direct beam sunlight systems were well carried out, they can filter the solar radiation thus offering adequate iluminance levels of daylight, more uniform light distribution and reduced heat gain.

Consequently, if the daylight systems are able to control and introduce in smaller quantities, sufficient only for daylight, the sun can be a supplemental light source, mainly in hot climates where the conflict between light and heat is more intense.

**Key Words: Delighting; Direct Beam Sunlight Systems; Light x Heat; Solar Radiation Control.**

---

## Capítulo 1

---

# Introdução

---

1 Introdução.....	01
Colocação do Problema.....	01
1.2 Objetivo.....	03
1.2.1 Objetivo Geral.....	03
1.2.2 Objetivos Específicos.....	03
1.3 Estrutura do Trabalho.....	04

## 1.1 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Diversas são as razões que levam à utilização da luz natural em edificações, entre elas, a alta eficiência luminosa, excelente reprodução de cores e menor conteúdo térmico, quando comparada com lâmpadas elétricas. Além disso, melhora a modelagem e a percepção visual dos espaços e objetos, devido às suas características direcionais e contribui para a orientação espacial e temporal (MOORE; 1991, ROBBINS 1986).

No entanto, deve-se sempre ter em mente que a iluminação natural tem uma estreita relação com a admissão de calor, sendo este um dos mais críticos conflitos no desenho de janelas (HOPKINSON 1966). A dialética entre a luz e o calor deve ser melhor estudada para que se possa utilizar a luz natural de forma consciente e racional.

Durante a história da arquitetura, a luz natural foi usada de acordo com a finalidade a que se destinava o edifício e com relação às características do meio ambiente em que estava inserido. Até o final do século XIX, a iluminação natural foi de fato considerada como um dos principais condicionantes de projeto.

Atualmente, um grande número de pessoas passa boa parte do dia (trabalho e lazer) em ambientes iluminados artificialmente. A utilização da luz artificial nos ambientes internos vem causando acréscimos significativos ao custo total de operação da edificação, poluição global do ambiente natural, além de proporcionar efeitos psicológicos e fisiológicos negativos ao homem. Por esses motivos, a iluminação natural tem se tornado uma estratégia em potencial para a conservação de energia.

A sua abundância, durante a maior parte do horário de trabalho, indica que *“(...) sistemas de aberturas e controles corretamente projetados podem garantir iluminação necessária para substituir a iluminação artificial, reduzindo a demanda de eletricidade tanto para a iluminação quanto para refrigeração.”* (PEREIRA, 1993).

Aberturas são, certamente, o mais fascinante elemento no projeto de uma edificação. É esperado que elas atendam simultaneamente a diversas funções ambientais, psicológicas, plástica, de segurança e operacionais; nas quais geralmente existem conflitos. Devido à sua alta sensibilidade com relação às variáveis climáticas e à sua direta ligação com o mundo externo, as aberturas podem ser a maior determinante do consumo energético da uma edificação (CARMODY, 1996).

A sua concepção é particularmente importante porque uma abertura oferece o caminho não apenas para a luz e o ar mas também para o calor, a chuva, a neve, a poeira, o barulho, o inseto, as pessoas, dentre outros. Por isso, existe uma necessidade de prevenção ou controle desses aspectos, de acordo com o desejo dos ocupantes.

Os sistemas de abertura podem ser classificados, resumidamente, como zenitais e laterais. Para escolha do sistema mais adequado, deve-se levar em conta a forma e a disposição dos ambientes que compõem o edifício, o tipo de tarefa visual a ser executada, bem como a condição de ordem econômica e tecnológica e aspectos relativos ao clima local (LAM, 1986).

No caso de ambientes iluminados lateralmente, os níveis de iluminação decrescem com o aumento da distância da janela, devido à direção predominante da luz solar – de cima para baixo. Essa característica direcional da luz resulta, normalmente, numa distribuição de iluminação interna não uniforme. Às áreas próximas à janela são bem iluminadas, enquanto as áreas mais afastadas podem mostrar-se bastante sombrias.

A principal vantagem de uma abertura zenital, com relação às aberturas laterais, é que a luz pode ser coletada diretamente do céu com o objetivo de iluminar uma área diretamente abaixo da abertura, ou seja, a luz não terá que ser redirecionada para iluminar o plano de trabalho. A principal desvantagem é que a luz proveniente de baixas alturas solares é transmitida de forma ineficiente. Além disso, esse sistema capta grande parte da luz proveniente de alturas solares mais elevadas, o que geralmente leva ao aquecimento excessivo do espaço interno, principalmente para baixas latitudes (EDMONDS 1995; MOECK, 1998; MOORE, 1991; ROBBINS 1986).

Uma das alternativas para compensar a não uniformidade de luz, gerada por aberturas laterais, e o aquecimento excessivo do ambiente interno, gerado por sistemas zenitais, seria a utilização de sistemas que utilizam pequenas quantidades de luz solar direta para a realização de iluminação natural no ambiente interno (BELTRAN, et al, 1994; BELTRAN, et al, 1997).

O controle da luz direta do sol também pode ser uma solução para o problema de introdução da luz natural em espaços internos profundos e também pode contribuir para o melhoramento do contraste, relativo à vista da janela.

Embora o redirecionamento da luz direta já tivesse sido mencionado na década de 60, através da utilização de vidros prismáticos, como uma técnica de iluminação natural, somente em meados da década de 70, com a crise energética mundial, a luz solar direta começou a ser levada em consideração como uma técnica em potencial para a iluminação e economia de energia (ROSENFELD & SELKOWITZ, 1977).

Essa estratégia de iluminação consiste em redirecionar uma pequena parcela da luz do sol, para alguma superfície – teto ou parede – que se tornará, por reflexão, uma de fonte iluminação secundária voltada para as superfícies de trabalho (LAM, 1986; SMART & BALLINGER, 1983).

Apesar de muitos pesquisadores (ROSENFELD & SELKOWITZ, 1977; LITTLEFAIR, 1990; BELTRÁN, 1994; BAKER 1993; MOECK, 1998) divulgarem e incentivarem a implantação de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol como uma técnica em potencial para a conservação de energia, que proporciona iluminação interna mais uniforme e luz natural em locais sem direto acesso a janelas, ainda não foram divulgados padrões que estabelecem as condições de ganho de calor solar provenientes desses sistemas, usualmente caracterizado através do Fator Solar (FS).

O conflito luz x calor intensifica-se nos climas quentes, uma vez que pequenos acréscimos térmicos podem implicar desconforto para os usuários. Nas edificações em climas quentes e úmidos (como as localizadas no Nordeste brasileiro, por exemplo), as aberturas são geralmente sombreadas, para que se possam evitar os ganhos térmicos provenientes da radiação direta do sol (MOECK, 1998).

No entanto, a prática projetual, para o controle da radiação solar direta, lança mão de dispositivos de proteção solar, que interferem significativamente no rendimento da iluminação natural.

Lam (1986) e Al-Shareef (2001) aconselham, para esses casos, fazer uso da iluminação com a luz do sol direta, para que os usuários possam usufruir dos seus benefícios térmicos e luminosos, além de proporcionar ambientes mais eficientes energeticamente.

Para que se possa obter uma otimização da iluminação, é importante controlar efetivamente a fonte de luz, de forma a oferecer apenas a quantidade e distribuição de luz necessária ao ambiente, e ainda eliminar o ofuscamento e o super aquecimento.

Muitas vezes, ao utilizar esse tipo de sistema, ...*“pequenas aberturas são suficientes para o adequado aproveitamento desta vasta quantidade de luz, que, de outra forma, seria desperdiçada de encontro às fachadas opacas”* (PEREIRA 1995).

Assim, acredita-se que o sol pode apresentar-se como uma fonte de luz suplementar, caso ela seja controlada e introduzida em pequenas quantidades, podendo proporcionar ambientes térmico e visualmente confortáveis, além de eficientes energeticamente.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural, que utilizam a luz direta do sol, com a finalidade de verificar a sua adequação para uma dada latitude ou condição climática.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência do tipo do sistema na distribuição das iluminâncias no ambiente;
- determinar experimentalmente o Fator Solar (FS) para cada sistema de abertura;
- analisar o desempenho térmico e luminoso dos sistemas analisados;
- indicar algumas diretrizes de projeto para a implantação do sistema a uma dada latitude ou condição climática

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados Experimentais e Conclusão. Na Introdução, faz-se a apresentação do tema a ser desenvolvido, abordando-se a importância do assunto e os objetivos a serem alcançados.

Na Revisão Bibliográfica, faz-se um estudo visando promover uma atualização do tema proposto na dissertação, a partir da abordagem dada pelos principais autores encontrados na literatura. Esse capítulo inicia-se com a evolução do uso de sistemas de iluminação natural na arquitetura, através dos tempos; logo após, aborda as fontes de luz natural e seus mecanismos de controle; também apresenta uma visão geral sobre sistemas de abertura e sistemas que utilizam a luz direta do sol para a iluminação natural e, por fim, é encerrado com uma breve abordagem sobre resfriamento passivo no nordeste do Brasil.

No capítulo três, é proposta uma metodologia de análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol.

No capítulo quatro, são mostrados e discutidos os resultados encontrados na investigação experimental, sob reais condições ambientais, onde os dados luminosos foram obtidos por meio de modelos em escala reduzida, e os dados térmicos, por meio do uso de um dispositivo experimental denominado Radiômetro de Abertura. Além disso, baseada no desempenho térmico e luminoso dos sistemas de iluminação natural analisados, foram elaboradas diretrizes de projeto, visando à adequabilidade dos sistemas de abertura ao Nordeste do Brasil.

Na conclusão, é apresentada a discussão final do trabalho, juntamente com suas limitações e propostas para trabalhos futuros.

---

## Capítulo 2

---

# Revisão Bibliográfica

2 Revisão Bibliográfica.....	05
2.1 Introdução.....	05
2.2 Histórico.....	05
2.3 Fontes de Luz Natural.....	07
2.3.1 Fontes de Luz Direta.....	07
2.3.1.1 Luz do Sol.....	07
2.3.1.2 Luz do Céu.....	08
2.3.2 Fontes de Luz Indireta.....	08
2.4 Mecanismos de Controle da Luz.....	09
2.4.1 Reflexão.....	09
2.4.2 Transmissão.....	10
2.4.3 Refração.....	10
2.5 Sistemas de Aberturas.....	11
2.5.1 Referencial Histórico.....	11
2.5.2 Função das Aberturas.....	11
2.5.2.1 Vista.....	12
2.5.2.2 Ventilação.....	13
2.5.2.3 Luz Natural.....	13
2.5.2.4 Luz do Sol.....	14
2.5.3 Desempenho Térmico e Luminoso de Aberturas.....	16
2.6 Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol.....	20
2.6.1 Sistemas Ativos.....	20
2.6.1.1 Dutos de Luz.....	20
2.6.1.1.1 Sistema de Coleta da Luz.....	21
2.6.1.1.2 Sistema de Transmissão e Distribuição da Luz.....	23
2.6.1.1.3 Sistema de Emissão da Luz.....	24
2.6.1.2 Sistema de Prismas Motorizados.....	25
2.6.1.3 Venezianas com Rastreamento Solar.....	26
2.6.1.4 Valra.....	26
2.6.2 Sistemas Passivos.....	27
2.6.2.1 Sistemas com Refletores de Luz.....	27



2.6.2.1.1 Prateleira de Luz.....	27
2.6.2.1.2 Sistemas de Iluminação Zenital com Refletores de Luz.....	26
2.6.2.2 Sistemas de Refração da Luz.....	28
2.6.2.2.1 Sistemas Prismáticos.....	28
2.6.2.2.1.1 Painéis Prismáticos que Redirecionam a Luz Direta do Sol.....	29
2.6.2.2.1.2 Painéis Prismáticos que Excluem a Luz Direta do Sol.....	29
2.6.2.2.2 Painéis Cortados a Laser (PCL).....	30
2.6.2.2.2.1 Abertura Lateral com PCL.....	31
2.6.2.2.2.2 Abertura Zenital com PCL.....	31
2.6.2.2.3 Sistema de Reflexão Interna Total.....	32
2.6.2.3 Sistemas Espelhados.....	32
2.6.2.3.1 Venezianas Espelhadas.....	32
2.6.2.3.2 Prateleira de Luz Curvada e Revestida com Película Reflexiva.....	33
2.6.2.3.3 Parapeitos e Conchas reflexivas.....	34
2.6.2.3.4 Forro Iluminante.....	34
2.6.2.3.5 Abertura Zenital com Duto de Luz.....	34
2.6.2.4 Sistemas de Lentes.....	35
2.6.2.5 Elementos Halográficos.....	35
2.6.2.6 Fibra Ótica.....	36
2.6.3 Considerações de Projeto para Sistemas que Utilizam a luz Direta do Sol..	37
2.7 Resfriamento Passivo no Nordeste do Brasil.....	38
2.8 Conclusão.....	40

## 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra uma visão geral a respeito de sistemas de aberturas. É iniciado a partir de um breve histórico; em seguida, aborda alguns aspectos relevantes ao projeto de sistemas de iluminação natural como as fontes de luz natural e seus mecanismos de controle.

Logo após, antes de apresentar os sistemas que utilizam a luz direta do sol para a iluminação natural, mostra alguns aspectos relevantes com relação aos sistemas de abertura como as suas funções nas edificações e características relevantes ao seu desempenho térmico e luminoso.

O último item, trata de estratégias bioclimáticas para o Nordeste do Brasil, região selecionada como representante das regiões de baixa latitude. Vale salientar que nesses locais as aberturas devem ser projetadas para lidarem com o delicado e intenso conflito entre a luz e o calor.

## 2.2 HISTÓRICO

Ao longo dos tempos, o sol foi adorado pela espécie humana. Seus benefícios foram reconhecidos, louvados e rezados (LAM, 1986). Historicamente, em civilizações antigas, o uso consciente da luz solar estava simbolicamente relacionado com a arquitetura religiosa (PEREIRA, 1993).

No antigo Egito, a matrização da luz era um dos aspectos mais salientes da arquitetura. Na grande pirâmide do grupo de Giza (fig. 1), foram utilizados dutos, ligados à superfície externa por pequenas aberturas, que penetram diretamente ao centro da pirâmide, para levar luz natural ao ambiente (GOITIA, 1995).

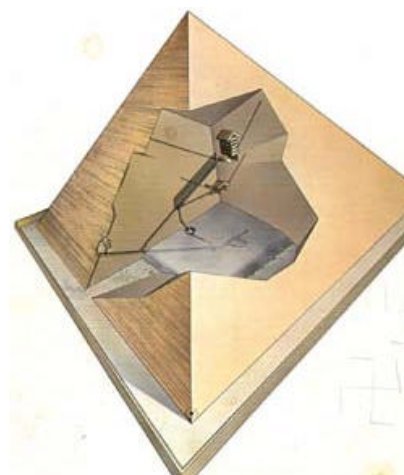
Em alguns templos, a luz era admitida por aberturas direcionadas para a posição do sol, em determinados horários e por aberturas zenitais preenchidas por grelhas de pedra, para suavizar a luz incidente (PEREIRA, 1995).

Na Grécia antiga, a iluminação dos templos era proveniente, principalmente, de aberturas laterais (portas). As colunas e os pórticos funcionavam como proteção do sol de verão e admitiam a entrada da luz direta do sol com baixa altitude (MOORE 1991; SZALABO, 1998).

No Panteão, templo romano encimado por uma cúpula, a iluminação, que provém de uma abertura circular no alto da construção, reflete-se nas paredes laterais e ganha uma qualidade difusa (MOORE 1991).

Na igreja gótica, as paredes não são estruturais e o vão é convertido em elemento translúcido e colorido, tornando-se agente transformador da luz (SZALABO, 1998).

A iluminação colorida desaparece na renascença que passa a valorizar a luz branca, indireta, que garantia uma caráter simbólico e místico às edificações. Aberturas escondidas e combinadas com



**FIGURA 1** – Grande pirâmide de Queóps.  
Fonte: Mansell, 1976.

sistemas de transferência de luz produziam uma luz misteriosa e proporcionavam a dramatização das formas das esculturas e dos espaços internos (BENÉVOLO 1978).

Vale salientar que o homem pré-industrial tinha necessidades muito diferentes dos atuais. Ele passava a maior parte do tempo ao ar livre, as atividades domésticas eram bastante simples e não demandavam grandes quantidades de luz.

Com o advento da Revolução Industrial, no século XIX, surgiram novas atividades internas que exigiam uma melhor iluminação. Foram percebidas, então, mudanças rápidas com relação a requerimentos e soluções para a luz natural (MOORE 1991).

Novas técnicas de produção do vidro foram desenvolvidas. O vidro, não apenas se tornou relativamente barato, mas viável de ser instalado em grandes áreas de fachadas. Isso só foi possível devido a grandes inovações na área de esquadrias, que agora poderiam ser feitas de aço - a nova arquitetura do ar e da luz estava surgindo (BAKER, 1993).

Consideráveis avanços com relação à iluminação artificial também foram feitos. O mais notável foi a invenção do gás incandescente feita por Welsbach em 1885 (BAKER, 1993).

Com a necessidade do aumento da iluminação nos ambientes internos, a evolução da iluminação artificial e o barateamento da eletricidade, os ambientes passaram a ser cada vez mais iluminados artificialmente.

No entanto, alguns arquitetos como Le Corbusier, Louis Kahn, Alvaraalto, entre outros, ainda consideravam a luz natural como fator determinante do projeto, sendo esta levada em consideração deste do início do processo de concepção. Diante desse complexo condicionante (a luz natural), esses arquitetos continuaram criando um novo vocabulário arquitetônico com o qual puderam projetar ambientes com boa qualidade luminosa.

A partir do surgimento do estilo internacional, desenvolveu-se um modo de projetar cada vez mais desvinculado das especificidades climáticas do sítio e das necessidades de conforto do homem.

Mies van der Rohe, com suas “cortinas de vidro”, criou um verdadeiro ícone de edifícios de escritório. O conseqüente “edifício estufa” foi assim exportado como um símbolo de poder, sem sofrer readaptações às características culturais e climáticas do local de destino. Essa situação tornou-se insustentável com a crise energética da década de 70, quando a partir daí, nasceram preocupações que norteiam pesquisadores até hoje (DUTRA, 1994).

Foi nesse período de crise que aumentaram as atenções para os benefícios da iluminação natural, embora o redirecionamento da luz direta já tivesse sido mencionado na década de 60, através da utilização vidros prismáticos, como uma técnica de iluminação natural (PEREIRA, 1993). Somente em meados da década de 70, com a crise energética mundial, a luz solar direta começou a ser levada em consideração como uma técnica potencial para a iluminação e economia de energia (ROSENFELD & SELKOWITZ, 1977).

## 2.3 FONTES DE LUZ NATURAL

De acordo com Moore (1991), para fins de projeto, as fontes de luz podem ser caracterizadas como:

- direta – luz do sol e luz difusa do céu;
- indireta – luz proveniente de difusores refletivos ou translúcidos, originalmente iluminados por outras fontes de luz primárias ou secundárias.

### 2.3.1 FONTES DE LUZ DIRETA

#### 2.3.1.1 LUZ DO SOL

*“Devido à distância entre o sol e a terra, a luz direta do sol se comporta como uma intensa fonte colimada proporcionando uma iluminação de 60 a 110 klux no plano horizontal, o que é 10 a 15 vezes a iluminação proporcionada pela abóbada celeste em caso de céu encoberto e também muito intensa para ser usada diretamente na iluminação de tarefa. A quantidade contida em  $1\text{m}^2$  de luz poderia garantir, caso uniformemente distribuída, em torno de 500 lux de iluminação sobre uma área de  $200\text{ m}^2$ ”* (PEREIRA, 1995).

Quando se deseja utilizar esta luz de forma racional, como fonte de iluminação para o ambiente, deve-se ter em mente, não só as suas vantagens, mas também as suas desvantagens.

O excesso de luz natural nos ambientes pode causar desconforto, tanto físico quanto psicológico (KOENIGSBERGER, et al, 1997). O seu alto conteúdo energético (luz e calor) é geralmente excluído do ambiente construído devido aos possíveis efeitos adversos sobre o ambiente térmico (superaquecimento), ambiente luminoso (ofuscamento) e integridade física dos materiais (PEREIRA 1992). Psicologicamente, locais com leve deficiência de iluminância podem ser mais confortáveis, pois a luz do sol está mentalmente associada ao calor e a sua redução ao frio (PEREIRA, 1992; KOENIGSBERGER, et al, 1997).

Para otimizar o desenho da iluminação natural indireta, o projetista tem que identificar o local onde a luz é desejada, onde estão localizadas as melhores superfícies de reflexão, ou onde elas podem ser criadas, e onde a luz pode ser originada (LAM, 1986).

Na maioria dos edifícios, o teto e as paredes mais altas geralmente são as únicas áreas que podem ser utilizadas para reflexão da luz. Além disso, o teto é normalmente a melhor localização para o redirecionamento da luz para superfícies horizontais. Para otimizar esse redirecionamento, algumas recomendações devem ser seguidas (LAM, 1986):

- direcionar o plano de reflexão de luz direta, de forma a evitar o nível dos olhos, a fim de não haver ofuscamento;
- utilizar altas refletâncias no teto;
- maximizar a refletância efetiva do teto – tetos mais simples, altos, sem muitas articulações e menos superfícies distribuem a luz de forma mais eficiente;

- maximizar a refletância das superfícies que recebem luz direta do sol, a fim de que elas possam redirecionar o máximo de luz possível para o teto.

O uso de pequenas áreas envidraçadas e o transporte eficiente da luz natural podem acarretar uma economia de energia sem penalidades como aumento da carga térmica da edificação, devido à radiação solar.

No entanto, a criatividade do projetista pode ser estancada devido à grande variação da luz solar e da disponibilidade da luz natural ao longo do dia e do ano. Diante disso, é de significativa relevância para o projetista um método prático para a visualização da geometria da insolação.

Em qualquer cálculo de irradiação ou de iluminância no plano em uma dada latitude, a informação mais relevante é a orientação direcional e espacial do raio de sol em relação à superfície da edificação.

As coordenadas solares em um determinado tempo (data e hora) são normalmente expressadas por dois ângulos: altura solar, que é a elevação angular do raio de sol sobre o plano horizontal e o azimute solar, que é o ângulo horizontal do plano de projeção do raio de sol em relação ao Norte (no Hemisfério Sul).

#### **2.3.1.2 LUZ DO CÉU**

Enquanto a luz solar é uma fonte pontual, a luz do céu é uma fonte superficial. Ela produz uma iluminação suave, não direcional, relativamente sem sombras. Os níveis de iluminação resultantes são consideravelmente menores do que os produzidos pela luz solar direta, podendo variar de 5.000 a 20.000 lux (MOORE, 1991).

Devido à complexidade de distribuição de diferentes condições reais do céu, foram referenciados apenas os dois tipos de céu padronizados internacionalmente: céu claro e céu encoberto.

O Céu claro se caracteriza pela inexistência de nuvens e baixa nebulosidade e em um dia com o céu completamente encoberto, não há luz solar direta atingindo o solo e a luz do céu é tão uniformemente difundida que o padrão de luminância de céu é visualmente simétrico com relação ao zênite. (LYNES, 1968; PEREIRA, 1994).

#### **2.3.2. FONTES DE LUZ INDIRETA**

Quando uma superfície relativamente fosca é iluminada por uma fonte primária, sua iluminância resultante a torna uma fonte indireta de iluminação. Uma vez que essa superfície pode ser considerada como difusora, ela se torna então, uma fonte distribuída – a qualidade e a distribuição de sua luz sendo virtualmente idênticas à luz do céu, admitida através de uma abertura de tamanho similar. Se iluminada diretamente pelo sol, a iluminação refletida por uma superfície branca pode chegar a 500.000 ou 10.000 lux, substancialmente maior que a luminância da abóbada celeste. De modo similar, materiais translúcidos podem ser utilizados como fontes indiretas (MOORE, 1991).

## 2.4 MECANISMOS DE CONTROLE DA LUZ

De fato, os projetistas parecem estar cada vez mais preocupados em obter um melhor controle da luz natural no interior das edificações, particularmente com as técnicas de luz do sol. Algumas soluções tendem a usar superfícies de alta refletividade com os espelhos e as pinturas especiais.

O sucesso do projeto de sistemas que utilizam a luz direta do sol depende:

- das propriedades reflexivas dos materiais;
- do uso inteligente e da combinação dos mecanismos de controle de luz;
- da correta integração com a geometria solar e viabilidade.

No sentido de capturar, conduzir e distribuir corretamente a luz do sol, quando e onde ela é necessária, é importante que se conheçam os principais mecanismos pelos quais ela pode ser manipulada. Além disso, a luz solar está constantemente em movimento e, dada a sua intensa luminância, ela deve ser utilizada em sua forma difusa, preferencialmente através de refletores secundários.

A luz do sol pode ser manipulada através do uso de uma série de mecanismos como reflexão, transmissão, refração, polarização, absorção, difusão, dentre outros. Porém, os três primeiros são os mais importantes para o projeto adaptado à luz solar.

Quando a luz incide numa superfície, uma fração  $\rho$  do total incidente é **refletida** e retorna ao hemisfério de procedência sem entrar na matéria; uma outra porção,  $\alpha$ , é **absorvida** pelo material, configurando-se num ganho de energia, enquanto a última fração  $\tau$  pode ser **transmitida** (no caso de superfícies transparentes ou translúcidas) para o outro lado.

### 2.4.1 REFLEXÃO

Os materiais podem refletir a luz de forma difusa (figura 2), ou seja, independente do ângulo de incidência, sendo a luminância da superfície o resultado apenas da iluminação do plano da mesma e da sua refletância; ou de forma especular, também chamada de “espelho”, por manter aparência, direcionalidade e tamanho da fonte original.



**Reflexão Difusa**



**Reflexão especular**

**FIGURA 2**– Esquemas ilustrativos de reflexão difusa e especular. Fonte: Baker, 1993.

Considerando a luz solar, uma boa combinação seria o uso de superfícies especulares, como refletores primários, para trazer a luz solar para dentro das edificações e refletores secundários difusos (ex. teto) para distribuir a luz no espaço interno. Deve-se ter cuidado, no entanto, com as superfícies que refletem de forma especular, pois, caso não sejam adequadamente controladas, podem causar ofuscamento.

Entretanto, em geral, as superfícies encontradas, na prática, não são nem perfeitamente difusas nem especulares, refletindo luz em várias direções, em diferentes proporções. O uso adequado de reflexões compostas (semidifusa ou semi-especular) pode ser bastante útil para o controle da direção da luz direta e/ou para suavizar as imagens.

### 2.4.2 TRANSMISSÃO

A transmissão (figura 3) se dá através de superfícies não opacas. É obtida em função do ângulo de incidência da luz e das características difusoras do material. A luz pode ser transmitida, tanto de maneira difusa como colimada, ou mesmo de uma forma combinada, produzindo resultados distintos no ambiente lumínico (MOORE 1991).



FIGURA 3 – Esquemas de superfícies com transmissão difusa e especular. Fonte: Baker, 1993.

Para um projeto adaptado à luz solar, o sistema ideal deveria transmitir a maior parte da luz visível, mantendo fora as porções ultravioleta e infravermelho do espectro solar. Novos tipos de vidro têm sido estudados e propostos no sentido de aumentar a transmissão da luz natural e reflexão do calor solar (SELKOWITZ & GRIFFTH, 1986).

### 2.4.3. REFRAÇÃO

O fenômeno de refração da luz ocorre quando a luz atravessa materiais com índices de refração distintos; a direção do fecho de luz é alterado durante sua trajetória através do material. Esse é o princípio dos blocos e painéis de vidros prismáticos. O principal aspecto negativo do fenômeno da refração é a distorção das imagens, o que sugere uma integração de porções da janela dedicadas distintamente à iluminação e à visão.

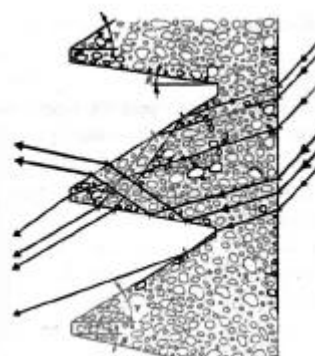


FIGURA 4- Refração da luz ao passar por um prisma. Fonte: Boubekri, 1999.

## 2.5 SISTEMAS DE ABERTURAS

### 2.5.1 REFERENCIAL HISTÓRICO

As janelas surgiram como um refinamento, uma evolução na construção do espaço arquitetônico, para tornar os locais mais habitáveis. Como tal, elas têm estado em desenvolvimento contínuo através dos tempos.

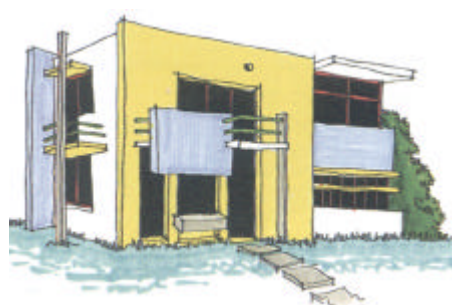
As maiores inovações no desenho de janelas foram incentivadas, principalmente, pelas inovações tecnológicas e construtivas, causadas pela implementação na utilização do ferro e do vidro no século XIX, que ofereceram as condições necessárias à sua autonomia. A conquista de maiores vãos, associada à idéia de leveza, por muito tempo, representava os avanços tecnológicos na arquitetura.

No Brasil... “essa evolução esbarra, a princípio, no atraso tecnológico que enfrentam os nossos construtores coloniais. Inicialmente, a janela nada mais era do que um furo, uma abertura deixada na parede de pau-a-pique, tijolos ou pedras” (OLIVEIRA, 1998).

Dutra (1994), considera a janela um dos mais expressivos elementos da fachada arquitetônica e destaca o tratamento dado, a esse elemento, por diversos arquitetos como Le Corbusier, Adolf Loos, Louis Khan, Eolo Maia e Mário Botta, que a tornaram, por sua vez, o mais importante elemento da fachada (figuras 5 e 6).



**FIGURA 5-** Vista interna da Notre Dame de Le Corbusier. Fonte: Lamberts et al, 1997.



**FIGURA 6-** Casa Schöder de Rietveld (linguagem neoclássica). Fonte Lamberts et al, 1997

### 2.5.2 FUNÇÃO DAS ABERTURAS

A janela tem a capacidade de interferir no espaço interno, além de funcionar como fonte de luz, ar e calor. Enquadra a parcela precisa da paisagem que será apreendida pelo usuário no interior da edificação, promovendo o rompimento da privacidade íntima do ambiente interno pelo cotidiano da cidade (OLIVEIRA, 1998; FRY, 1982).

A utilização correta do sistema de aberturas possibilita que trocas térmicas, luminosas e visuais entre o interior e o exterior da edificação aconteçam da maneira desejada, privilegiando o conforto físico e psicológico do usuário. A sua escolha se dará em função de quatro grupos de considerações: estética, funcionalidade, desempenho energético e custo.



A sua concepção é particularmente importante, visto que uma abertura oferece o caminho não apenas para a luz e o ar mas também para o calor, a chuva, a neve, a poeira, o barulho, os insetos, as pessoas. Dessa forma, existe uma necessidade de prevenção ou controle destes aspectos, de acordo com o desejo dos ocupantes, implicando aberturas bem dimensionadas aliadas a elementos de controle, como persianas, cortinas, venezianas, vidros, portas, dentre outros – como forma de preenchimento (CARMODY, 1996).

Sem nenhuma dúvida, o material mais importante para ser utilizado no controle seletivo é o vidro. As janelas envidraçadas são mais versáteis e dominantes com relação ao contato visual entre o espaço interno e externo. Enquanto permite a entrada da luz, impede a entrada da chuva e de insetos, da neve e da poeira. No entanto, o elemento também possui algumas desvantagens: a perda da privacidade, a associação da luz ao calor (efeito estufa) e, dependendo da espessura, o vidro oferece pouca redução de ruídos e isolamento térmico.

Atualmente, as aberturas vêm se tornando mais complexas, com o uso de vidros seletivos especiais e dispositivos auxiliares filtrantes, para proporcionar melhores resultados diante do entorno.

As aberturas são comumente referidas como os “olhos, os ouvidos e a língua do edifício”; são consideradas um dos mais importantes elementos do envoltório da edificação. Realmente, algumas vezes, elas são o próprio envoltório.

Sendo um elemento polifuncional, a janela possui uma série de finalidades: ambientais (luz natural, ventilação, aquecimento), psicológicas (acesso à luz natural, à luz do sol), vista do exterior; plásticas, de segurança e operacionais (CARMODY, 1996; PEREIRA, 1992). Esta seção irá apenas concentrar-se nos dois primeiros itens, o que já deixa o projetista com muitos requerimentos conflitantes em termos da otimização do projeto de aberturas.

### 2.5.2.1 VISTA

As aberturas nos permitem manter contato com o espaço externo, desde que as janelas permitam ver dentro e fora. O lado negativo da comunicação visual está relacionado com a privacidade, a qual é encarada de diversas formas, por diferentes culturas, de acordo com a significância e a concepção de privacidade.

Heerwagen (1990) enumerou quatro benefícios provenientes da ligação visual com o mundo exterior, promovidos pelas janelas:

- 1- Acesso às informações do ambiente: condições gerais do clima, hora do dia.
- 2- Acesso a trocas sensoriais: estímulo psicológico devido à exposição do organismo às variações das condições ambientais.
- 3- Conexão com o mundo exterior: forma de aliviar o sentimento de confinamento e isolamento.
- 4- Recuperação e restauração: alívio visual produzido pela satisfação da vista.

A maneira como a janela proporciona a vista é através da apresentação de uma parte da cena exterior. Obviamente, depende da dimensão, forma, posição da janela e da posição do observador com relação à mesma.

### 2.5.2.2 VENTILAÇÃO

Em geral, há duas maneiras de promover o movimento do ar no interior das edificações sem recorrer a sistemas mecânicos:

- A primeira seria estimular o movimento do ar por meio de chaminés e diferença de temperatura.
- E uma segunda e mais efetiva seria permitir a ventilação cruzada por meio de pressão do vento .

Segundo Givoni (1982), a ventilação de um edifício depende de parâmetros definidos pelos projetistas:

- orientação da abertura com relação ao vento;
- tamanho da abertura;
- ventilação cruzada (aberturas localizadas em ambas as zonas de pressão e de sucção);
- subdivisão do espaço interno;
- dispositivos de filtragem, como: venezianas, dispositivos de sombreamento, cortinas, entre outros.

### 2.5.2.3 LUZ NATURAL

A seguir, serão listadas algumas razões que explicam por que a luz natural tem muita influência na qualidade de vida nos ambientes internos (ROBBINS 1986; DOGNIAUX, 1987).

- Contribuição para o aumento do interior devido as suas características direcionais.
- Contribuição para orientação espacial e temporal: a luz do dia ajuda, não apenas a marcar a passagem do tempo com a sua variação cíclica, mas também alimenta nosso senso de orientação espacial.
- Apesar de a luz do dia ter uma grande oscilação, ela possui uma fonte de espectro completo e tem excelente reprodução de cor.
- A maior parte das informações necessárias sobre o que está acontecendo a nossa volta é providenciada pela luz e percebida pelo nosso sistema ótico.

Apesar de ambas, luz do sol e luz do céu, proporcionarem iluminação, a luz do sol tem geralmente sido relacionada aos seus benefícios térmicos e psicológicos; com a luz do dia, os estudos parecem estar concentrados na quantidade e na qualidade da luz proporcionada (KHEIRA, 1991). Devido a seu alto conteúdo energético (aspectos térmicos) e luminosos (aspectos visuais) a luz do sol tem usualmente

sido ignorada com relação ao desenho das janelas para iluminação. O fato é que a maior parte das reclamações com relação ao ofuscamento é devido à luz direta do sol.

Atualmente, existe uma tendência emergente de dividir a janela em duas porções horizontais: a porção mais baixa é usada, essencialmente, para proporcionar a vista do espaço externo e eventualmente ganho térmico; a parte superior seria para proporcionar a iluminação com reduzidos riscos de ofuscamento por produzir uma distribuição de luz natural mais adequada no ambiente.

Recentemente, a luz do dia, entendida como o uso consciente da luz natural para compensar a necessidade da luz elétrica, é considerada uma estratégia em potencial de conservação de energia, ocupando um alto lugar no “*ranking*” de recomendações - no ASHARE standard (BRYAN, 1990). No momento um razoável esforço tem sido feito para garantir a integração da luz natural, da luz artificial e dos sistemas de resfriamento/aquecimento para uma efetiva conservação de energia nas edificações (SELKOWITZ & GRIFFITH, 1986; CIBSE, 1987; CAIRNS & SELKOWITZ, 1988; LITTLEFAIR, 1990).

#### 2.5.2.4 LUZ DO SOL

O acesso da luz do sol na edificação ou no seu envoltório tem sido um assunto amplamente discutido e ainda não se chegou a um consenso. Infelizmente, nos dias de hoje, a luz do sol na arquitetura tem sido tratada como um problema e não como uma oportunidade de ser beneficentemente explorada (MOORE, 1991).

A respeito da admissão da luz do sol nas edificações, o projeto das aberturas depende basicamente dos seguintes aspectos:

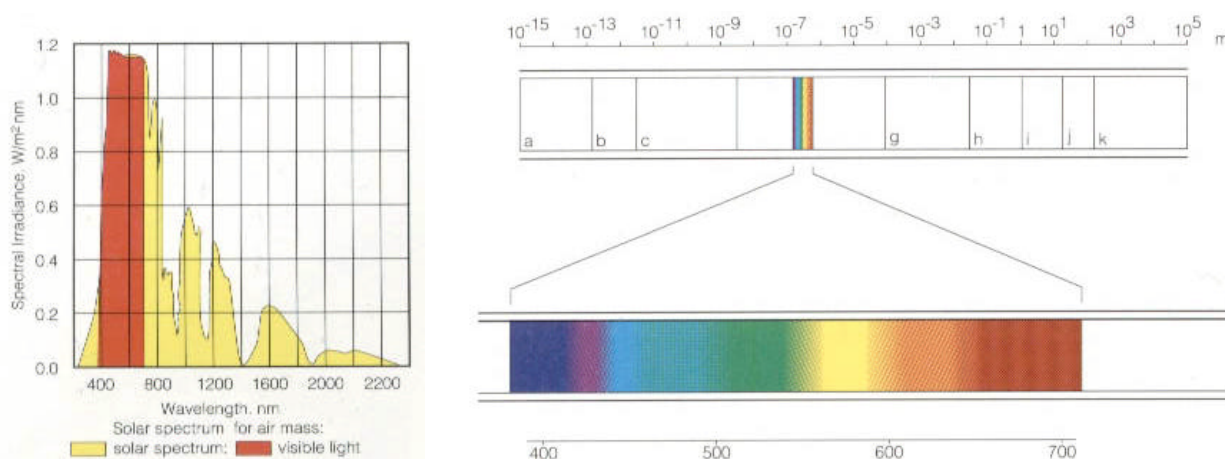
- o desejo das pessoas pela luz do sol (psicologicamente, a luz provoca bem-estar e melhora a aparência do cenário – entorno);
- a luz do sol pode ser admitida para propósitos de aquecimento;
- a luz do sol é excluída devido a superaquecimento, ofuscamento e desbotamento de tecidos.

Até o momento, um dos mais críticos conflitos no desenho de janelas é o ganho solar versus luz natural. Quanto mais luz do sol penetra pelas janelas, ocorre mais ganho de calor (que pode ser bem-vindo ou não, de acordo com o clima em questão) e mais iluminação interna (bem-vinda ou não dependendo do desejo da iluminância do entorno), enquanto isso, pouca luz do sol implica um menor ganho térmico e menos luz.

A relação entre o desempenho das aberturas, em termos de admissão de energia solar nas edificações e o resultado do ambiente luminoso interno, é bastante delicada, pois o calor e a luz viajam juntos, e os requerimentos da edificação, para o seu uso, são geralmente conflitantes.

Dentro do limite da radiação solar, existe uma porção do espectro entre 0.4 e 0.7 *microns*, que é visível ao sistema visual humano – espectro visível. Essa parte é chamada de radiação luminosa ou simplificando luz. Não é verdade que toda radiação luminosa seja proveniente de origem térmica (por exemplo, radiação proveniente de lâmpadas fosforescentes e fluorescentes) que não estão incluídas neste trabalho.

A parte visível do espectro solar mais a porção inferior do espectro térmico (UV) são comumente classificadas como adição de comprimento de ondas curtas, devido ao conteúdo de alta energia pelos quais são gerados. Por outro lado, a porção superior do espectro térmico, região infravermelha, é chamada de radiação de comprimento de ondas longas, que são emitidas por superfícies de temperatura superior a 5000 °C (ver figuras 7 e 8).



**FIGURAS 7 e 8** - Porção do espectro da radiação solar correspondente à luz visível. Fonte: Baker, 1993.

De acordo com Lamberts e co autores (1997), para se conhecer a quantidade de calor que penetra em um ambiente através de uma abertura, é importante conhecer o conceito de fator solar (FS). O Fator Solar de uma abertura pode ser entendido como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa a janela pela quantidade de energia solar que nela incide. Esse valor é característico para cada tipo de abertura e varia com o ângulo de incidência da radiação solar. Para o vidro simples, com a incidência direta da radiação solar normal à superfície, o fator solar é aproximadamente 0,85. Isso significa que 85% da radiação solar incidente sobre a janela com vidro simples penetram no interior sob forma de calor.

Utilizando sistemas de aberturas com fatores solares baixos, controla-se a entrada de calor para o interior. No entanto, nesses casos, deve-se ponderar a iluminação natural, que não pode ser reduzida na mesma proporção da entrada de calor.

Em geral, o ganho de calor solar através das aberturas depende:

- da distribuição da radiação incidente;
- da velocidade do ar, interna e externa, e da temperatura adjacente aos elementos da abertura;
- das propriedades solares dos elementos da abertura (transmitância angular, absorptância e refletância).

Os primeiros dois itens mudam ao longo do tempo e diante das forças do ambiente natural. O terceiro item mune o projetista com o desenho básico de elementos que pode ser manipulado em perseguição de um balanço adequado para os dados solares da abertura.

Em princípio, a verificação dos dados finais de calor solar nos sistemas de iluminação natural requer o conhecimento da distribuição da energia nos espaços internos, desde que as superfícies possam apresentar diferentes propriedades termo-solares. No entanto, na prática, para satisfazer as medições em maquete, o conhecimento da quantidade total de energia solar admitida é suficiente (PEREIRA 1992).

### 2.5.3 DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO DE ABERTURAS

As principais trocas térmicas e luminosas de uma edificação acontecem, geralmente, em fechamentos que compõem as janelas, clarabóias e qualquer outro elemento transparente.

Nesses elementos, a luz incidente, como visto no item 2.4, pode ser refletida, absorvida e transmitida. Também podem ocorrer três tipos básicos de trocas térmicas: condução, convecção e radiação. Com relação às duas primeiras, o comportamento é semelhante aos dos fechamentos opacos; caso sejam móveis, acrescenta-se a possibilidade do controle das trocas de ar entre o interior e o exterior, basicamente ao abri-los ou fechá-los. A radiação é o principal fator diferencial devido à sua parcela, diretamente transmitida para o interior (inexistente nos fechamentos opacos), que depende da transmissividade do vidro ( $\tau$ ).

Na prática, quando uma janela está sujeita à incidência da radiação solar, ela pode causar (PEREIRA, 1994):

- acréscimos consideráveis na carga de refrigeração;
- temperatura interna excessivamente alta;
- ofuscamento e desconforto devido à radiação direta do sol.

McCluney (1993) diz que o *efeito estufa* é o maior efeito transformador da radiação solar em calor no interior. A radiação solar de onda curta que entra por uma abertura no edifício incide nos corpos que se aquecem e emitem radiação de onda longa. O vidro é opaco a essas ondas que se situam na faixa dos raios infravermelhos. Dessa forma, o calor não encontra passagem para o exterior, superaquecendo o ambiente interno.

Segundo Koenigsberger et al (1977), existem três variáveis situadas na zona de ação dos projetistas para controlar a radiação solar através de uma janela:

➤ **Orientação e Tamanho**

Podem-se utilizar cartas solares como um dispositivo de visualização da radiação incidente em fachadas. Analisando a altura e o azimute solar, pode-se saber quando o sol está incidindo diretamente em uma fachada e qual o ângulo de incidência da radiação solar. Esse dado irá interferir na quantidade de calor e de luz solar direta que penetra pela abertura.

➤ **Proteções Solares Internas ou Externas**

As proteções solares internas são bastante flexíveis sob o ponto de vista de operação, porém, não evitam o efeito estufa, pois o calor solar que as atinge se transforma em radiação de onda longa, permanecendo, em sua maior parte, no ambiente interno.

Já as proteções externas bloqueiam/controlam a radiação solar direta antes desta penetrar pelo vidro, evitando o efeito estufa.

➤ **Tipos de Vidros**

Vários propósitos podem servir de argumento na escolha do tipo de vidro a ser utilizado em uma abertura. Entre eles, o controle da radiação solar que pode ser resumido em:

- admitir ou bloquear a luz natural;
- admitir ou bloquear o calor solar;
- permitir ou bloquear as perdas de calor do interior;
- permitir o contato entre interior e exterior.

*“Os vidros têm geralmente alta transmitância térmica ( $U$ ), ou seja, são bons condutores de calor. A radiação solar incidente em um fechamento transparente pode ser absorvida, refletida ou transmitida para o interior, dependendo da absortividade ( $a$ ), refletividade ( $r$ ) e da transmissividade ( $t$ ), do vidro respectivamente. A parcela absorvida se converte em calor no interior do vidro e pode ser reemitida tanto para o exterior quanto para o interior na forma de radiação de onda longa. Quando maior for o ângulo de incidência da radiação, maior tenderá a ser a parcela refletida pelo vidro. Uma parte da radiação solar é transmitida diretamente para o interior através da transparência do vidro” (LAMBERTS et al, 1997).*

Os vidros simples são os mais utilizados nas edificações no Brasil devido ao seu baixo custo e disponibilidade no mercado. Entretanto, esse tipo de material é altamente transparente a ondas curtas e opaco a ondas longas, o que gera boa visibilidade, porém alta transmissividade da radiação solar para o interior. Também são pouco reflexivos às ondas curtas e longas. O fato do vidro ser opaco à onda longa causa o fenômeno conhecido por efeito estufa. Em outras palavras: uma vez transmitido para dentro, o calor encontra dificuldade em sair pelo vidro, sendo então acumulado no ambiente interno.

Como o fluxo radiante, transmitido através das aberturas, afeta tanto o desempenho térmico quanto luminoso, a análise combinada do impacto desses dois parâmetros sobre a edificação, torna-se uma questão decisiva para a otimização do uso de energia em edificações.

Diante da importância dessa avaliação combinada, muitos autores vêm tentando estabelecer a relação entre o ganho solar e a iluminação interna produzida por cada sistemas de abertura.

Petherbridge (1965), analisando as características de transmissividade das aberturas envidraçadas, sugeriu a utilização de uma proporção de calor/luz (fator solar dividido pela transmissão de luz). Valores de proporções menores do que a unidade indicam vidros com ganho solar reduzido e mais transmissão de luz, ou seja, vidros que absorvem ou refletem a radiação infravermelha. Por outro lado, valores de proporção maiores do que a unidade indicam vidros seletivos que absorvem a radiação visível.

No entanto, existem limitações no uso desta proporção, por exemplo, no caso de sistemas envidraçados com diferentes ganhos solares e transmissão da luz, mas eventualmente mesma proporção de calor/luz, gera pouca informação sobre o desempenho térmico e luminoso dos sistemas a serem analisados.

Outra abordagem, para estimar o desempenho térmico e luminoso dos sistemas de abertura, é dada por Davenport & Nall (1983), que desenvolveram uma regressão envolvendo luz natural e ganho de calor solar, denominada "*Statistical Daylight Model*" (SDM).

Segundo Pereira (1992) foram detectadas três itens que questionam a confiabilidade dessa regressão:

- 1- não foi comprovada a suposta relação entre a luz do dia e o ganho de calor solar;
- 2- não foram feitas medições experimentais em modelos em escala, com diferentes tipos de abertura e condições representativas de céu;
- 3- não foram feitos cálculos do ganho de calor solar para cada condição estudada.

Procurando estimar os impactos térmicos em conjunto com os benefícios luminosos dos sistemas de abertura, Place et al (1984), sugeriram o uso de um índice denominado '*Solar System Luminous Efficacy*' (SSLE), definido como a proporção da luz natural utilizada no plano de trabalho com o total da energia solar radiante admitida no espaço, expressa por Lumen/Watt.

Esse índice pode ser aplicado em conjunto com o índice das lâmpadas elétricas, denominado "*Electric System Luminous Efficacy (ESLE)*", em simulações computacionais de eficiência energética, onde pode ser detectado o efeito térmico no ambiente diante da substituição da iluminação artificial por natural.

Vale salientar que, nessa abordagem, cada sistema de iluminação natural apresenta uma relação constante entre a luz natural e o ganho solar. No entanto este índice não pode ser utilizado diante da presença de luz direta no espaço ou do uso de sistemas inovativos de iluminação natural.

Outro aspecto importante é que o SSLE não leva em consideração a distribuição de luz no ambiente, ou seja, não considera que alguns sistemas de abertura, como sistemas de aberturas laterais simples, por exemplo, distribuem a luz de forma irregular, o que não acontece com sistemas de iluminação artificial.

Arasteh e co-autores (1985) introduziram a concepção “*Task Efficacy*”, que se refere as cargas de resfriamento associada com o fluxo luminoso que atinge uma determinada localização. Neste caso a “*Task Efficacy*” da luz natural para um determinado sistema de abertura, dá-se em função das seguintes características dessa abertura:

- (i) *Coefficiente de sombreamento relativo a transmitância visível*:  $K_e$  é definido como a proporção da transmitância visível com o coeficiente de sombreamento. Quanto maior o  $K_e$ , menor o ganho de calor solar para uma certa quantidade de luz natural.
- (ii) *Distribuição de luz interna em função das características da abertura e do espaço*:  $K_s$  é definido como a proporção de iluminância de um ponto com relação a outro ponto com iluminâncias considerada ideal. A iluminação ideal pode acontecer se o fluxo luminoso que entra no espaço for uniformemente distribuído através de todo o espaço.
- (iii) *Tempo de dependência da admissão da radiação solar*:  $K_f$  é definido como a proporção entre a iluminância utilizada em um determinado ponto com a iluminância total desse ponto. Qualquer valor acima desse limite não promove qualquer economia de energia e pode contribuir para o aumento das cargas de resfriamento.

Assim, Arasteh et al (1985), sugeriu a implantação de um índice que avaliaria o impacto da luz natural e da carga de resfriamento proporcionado por cada sistema de abertura. Este índice denominado “*Daylight Coolness Index*” (DCI) é definido como o produto dos três índices citados acima.

$$DCI = K_e \times K_s \times K_f \quad (1)$$

Um DCI igual a unidade representa um sistema de iluminação natural ideal como pouco impacto na carga de resfriamento. No entanto, todos os três itens dependem de muitos fatores (como geometria das aberturas, propriedades físicas, forma de utilização da edificação, entre outros), o que torna difícil a implementação do DCI na análise comparativa de sistemas de iluminação natural, com exceção dos sistemas simples de aberturas.

No entanto, de uma forma ou de outra, todas as propostas apresentadas mostram a importância da realização de um estudo mais detalhado a respeito do fluxo térmico e luminoso transmitido através das aberturas e foi justamente essa falta de informações, a respeito de modelos de simulação e procedimentos de experimentação para melhor entender o comportamento térmico e luminoso das aberturas, que estimulou a realização deste trabalho.



## 2.6 SISTEMAS E ILUMINAÇÃO NATURAL QUE UTILIZAM A LUZ DIRETA DO SOL

Com já havia sido citado no item 1.1, a utilização de sistemas de iluminação natural que conduzem a luz direta do sol pode ser uma solução para diversos problemas, tais como (AIZLEWOOD, 1993):

- introdução da luz natural em espaços internos profundos;
- má distribuição da luz natural;
- melhoramento do balanço do brilho do espaço, relativo à vista da janela;
- diminuição da carga térmica do ambiente, caso a radiação solar seja admitida de forma moderada - em pequenas quantidades.

As estratégias que utilizam a luz direta do sol, revisadas neste trabalho, utilizam sistemas óticos ativos ou passivos. Lentes prismáticas, refletores especulares, prateleira de luz são freqüentemente utilizados de forma passiva como dispositivos fixos. Enquanto os sistemas ativos, ou seja, que seguem a trajetória solar, normalmente usam refletores motorizados, para redirecionar a luz do sol até uma determinada área focal.

### 2.6.1 SISTEMAS ATIVOS

Sabe-se que o sol não é estacionário e pode ser conduzido ou refletido através de espelhos e/ou lentes. Para acompanhar a sua trajetória, é necessária utilização de mecanismos de rastreamento do sol, produzindo um sistema usualmente chamado de heliostato.

Esses sistemas ativos podem se tornar complicados, no sentido de que os mecanismos que seguem a trajetória solar ainda são muito caros e exigem manutenção freqüente (WILCOX & CUNNINGHAM, 1986; PEREIRA, 1992).

#### 2.6.1.1. DUTO DE LUZ

O duto de luz é provavelmente a mais interessante inovação tecnológica dos sistemas de iluminação natural, principalmente pela longa distância que pode ser percorrida pela luz canalizada. Existem uma série de publicações a respeito desse sistema (BELTRÁN, 1994; BELTRÁN, 1997; COURRET, 1998; CHEUNG, 1996; RUCK, 1985), onde é sugerido como uma possibilidade de controle, distribuição e condução da luz natural, para lugares sem acesso a ela.

No entanto a maior parte desse tipo de sistema encontra-se instalada em locais de difícil manutenção e implantação. A sua produção em grande escala para a iluminação de edificações ainda é uma promessa para o futuro (BORG, 1994; LITTLEFAIR, 1990). No entanto, apesar dessa tecnologia ainda ser rara em muitos países - apenas a Rússia, que possui uma grande tradição em pesquisa com dutos de luz - existem mais de 45000 instalações (BORG, 1994).

Estudos realizados por Shao e co-autores (1998) e Oakley (2000) indicam que os dutos de luz podem ser um dispositivo efetivo para a introdução da luz natural nos edifícios, desde que seja projetado cuidadosamente para evitar aspectos excessivos de proporção e números de curvas.

Para que o duto de luz mantenha uma eficiência razoável, Beltran (1997) recomenda:

- utilizar equipamentos que acompanhem a luz do sol de forma ativa;
- ser pequeno o suficiente para ajustar-se a outros sistemas do edifício;
- ajustar o sistema refletor, de modo que se possa minimizar as inter-reflexões de luz do sol dentro da seção do duto, de forma a simplificar o percurso da luz.

Devido a sua capacidade de conduzir a luz natural em locais sem direto acesso ele, esses sistemas podem gerar ambientes mais saudáveis, pois, de acordo com Fontoynt (1999), 50 lux de luz natural por dia podem significar um alívio para o sentimento de isolamento das pessoas que trabalham em espaços no subsolo.

Ao projetar um duto de luz, devem-se levar em consideração não só aspectos luminosos, mas também aspectos térmicos, pois, ao penetrar no duto, a luz do sol concentrada irá conter uma grande carga de energia térmica radiante, que deverá ser focada, ao longo do duto, junto com a luz. Como já foi citado, o espectro solar possui raios ultravioleta e infravermelho, que não contribuem para a visibilidade, mas podem penetrar nas edificações junto com a luz visível, termalizando-a e sobrecarregando os sistemas de condicionamento de ar. Esse calor pode ser desvanecido ou reduzido, ao final do seu percurso, através de sistemas espelhados ou filtros (LITTLEFAIR 1990).

Para excluir os raios infravermelhos do ambiente, tem que se recorrer a um filme delgado com propriedades técnicas seletivas. Espelhos e lentes podem ser cobertos com camadas de materiais não-metálicos (dielectric) que produzem uma série de interfaces de reflexão e transmissão, calculadas para refletir uma parte do comprimento de onda e transmitir o outro. Dessa forma é possível fazer um espelho seletivo para refletir a radiação visível e ser transparente a radiação infravermelha ou vice-versa. Este material é chamado de DICHROC ou espelho frio (RUCK, 1988).

Já no componente ultravioleta, de mais fácil remoção, utilizam-se materiais óticos, com composição apropriada para impedir o acesso do raio ultravioleta com comprimento de onda abaixo de 350 nm (RUCK, 1988).

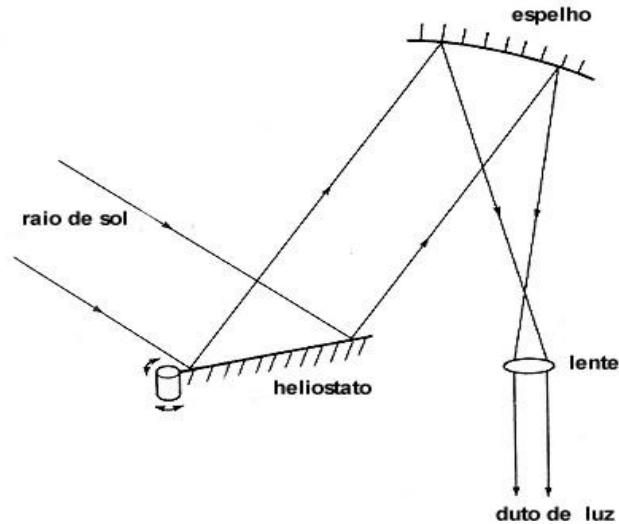
De acordo com PEREIRA (1993), o sistema do duto de luz é composto a partir de três sub-sistemas:

- 1-sistema de coleta da luz;
- 2-sistema de transmissão e distribuição da luz;
- 3-sistema de emissão da luz.

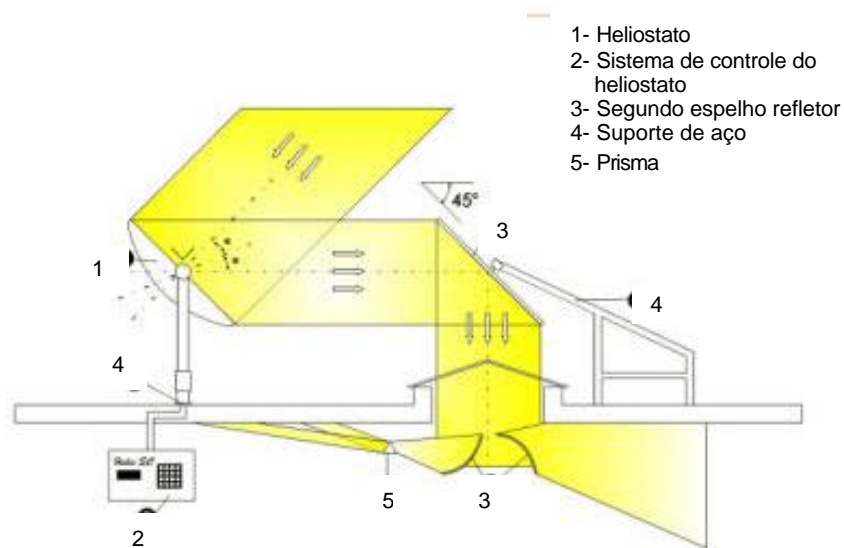
#### **2.6.1.1.1 Sistema de Coleta da Luz**

Antes de penetrar no duto de luz, o raio de sol tem que ser concentrado através de lentes, espelhos ou de qualquer outro material que possua superfície especular. Para uma melhor eficiência do

sistema, acopla-se a estes coletores sistema de rastreamento solar, produzindo um sistema usualmente chamado de heliostato, com ilustram as figuras 9 e 10 (PEREIRA, 1993; BELTRAN, et al, 1994, LITTLEFAIR, 1990).



**FIGURA 9** – Esquema de funcionamento do heliostato – redirecionando a luz para um duto. Fonte: [www.frdge.arch.edu.au](http://www.frdge.arch.edu.au). Jul/2001.



**FIGURA 10**– Esquema de funcionamento do heliostato – redirecionando a luz para um sistema de iluminação zenital. Fonte: [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de) - Jul/2001

Os heliostatos são caros e requerem um sistema de controle complexo que mantenha o rastreamento solar todo o tempo. Além disso, um outro problema é o tamanho requerido. Por exemplo: um espelho com área de  $8\text{m}^2$  irá proporcionar luz para um escritório de  $1000\text{m}^2$  caso o sistema tenha 100% de eficiência. Na realidade, o sistema tem uma eficiência por volta de 20%. Assim, é necessária uma área do coletor do heliostato de  $40\text{m}^2$ , ou seja, um espelho de 7m de diâmetro, que no sistema

proposto, tenha que rastrear o sol. Assim, acredita-se que a utilização de um heliostato eficiente, através de uma tecnologia viável, é uma proposição dispendiosa e de difícil manutenção (LITTLEFAIR, 1990).



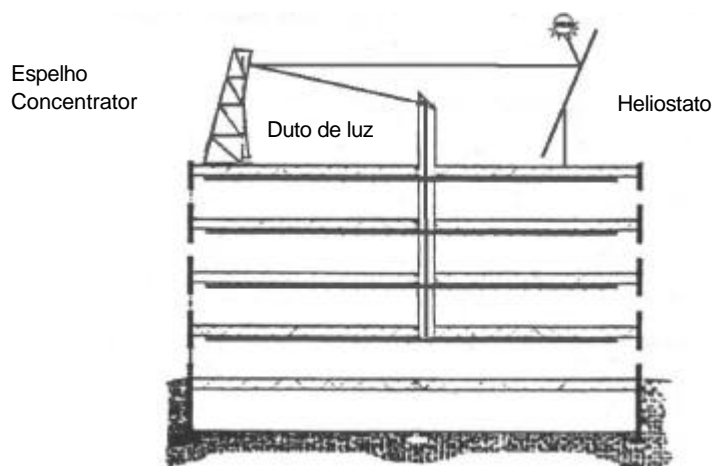
**FIGURA 11 e 12** – Coletores de luz com rastreamento solar – heliostato.  
Fonte: [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de). Jul/2001



**FIGURA 13**- Luz captada através do heliostato, mostrado na figura 12, sendo introduzida no ambiente interno. Fonte: [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de). Jul/2001

#### 2.6.1.1.2 Sistema de Transmissão e Distribuição da Luz

O sistema de transmissão e distribuição da luz coletada do sol, dentro de uma edificação, consiste numa estrutura tubular que atravessa os pisos verticalmente e possui ramificações horizontais para cada pavimento, chamadas dutos de luz, ilustrados na figura 14 (PEREIRA, 1995; BORG, 1994).

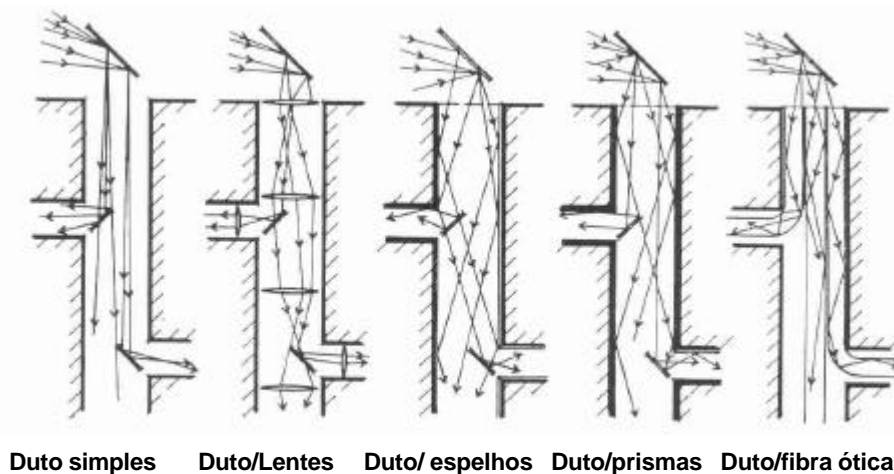


**FIGURA 14** - Esquema de funcionamento de um duto de luz. Fonte: Pereira, 1993.

Esses dutos, em princípio, são constituídos por materiais que possuem superfície de alta refletividade. No entanto, superfícies internas lisas possuem pouco controle da luz. Para que se possam reduzir as suas atenuações, causadas pelas múltiplas reflexões, diversas variantes têm sido apresentadas, como mostra a figura 15 (PEREIRA, 1993; [www.frdge.arch.edu.au](http://www.frdge.arch.edu.au), jul/2001; LITTLEFAIR 1990, RUCK 1988) :

- 1- Dutos com planos metálicos reflexivos ou espelhados;
- 2- Dutos com lentes;
- 3- Dutos com espelho;
- 4- Dutos com prismas;
- 5- Dutos com fibra ótica.

Também podem ser utilizados os filmes microprismáticos, denominados OLF (Optical Lighting Film), que possuem uma alta eficiência em relação à reflexão e controle da luz. Muitos filmes acrílicos, como é o caso do TRAF (Transmissive Right Angular Film), permitem a passagem da luz proveniente de determinados ângulos, enquanto a luz proveniente dos outros ângulos é refletida (BORG, 1994).



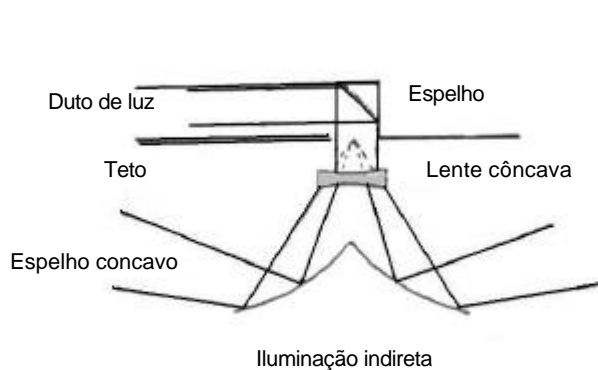
**FIGURA 15** – Variantes do sistema de redirecionamento de luz.. Fonte: Ruck, 1988.

#### 2.6.1.1.3 Sistema de Emissão da Luz

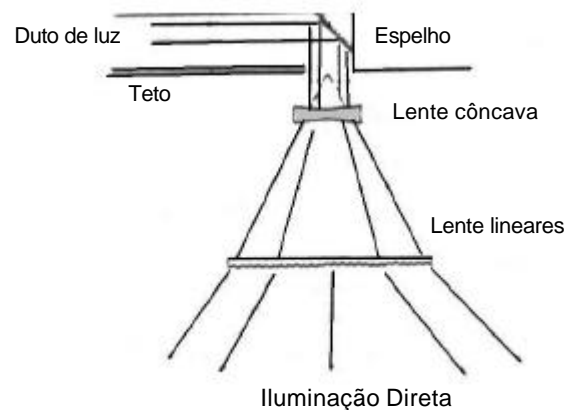
Para que a luz coletada e emitida seja entregue ao espaço interno, faz-se necessário um elemento denominado “luminária solar”. Nas figuras 16 e 17 são apresentadas duas opções de sistemas emissores: “(...)ambos usam lentes côncavas para espalhar o fecho de luz, mas, enquanto um usa lentes tipo fresnel (lineares) para produzir uma iluminação direta, o outro proporciona uma iluminação indireta, refletindo a luz sobre o teto através de espelhos côncavos” (PEREIRA, 1993).

Um dos maiores problemas com os dutos de luz é a total ineficiência do sistema diante da ausência da luz natural. Diante disso, faz-se necessário a integração com o sistema de iluminação artificial.

*“Em geral, o alto custo associado à instalação, custos de operação, e manutenção de sistemas de rastreamento da luz solar são fatores limitantes para a aplicação do sistema” (PEREIRA, 1993).*



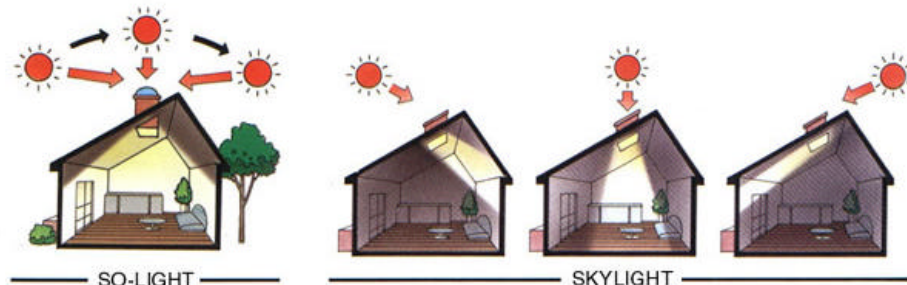
**FIGURA 16** – Luminária solar com lente côncava, iluminando o ambiente de forma difusa e indireta, através do uso de um espelho côncavo. Fonte: Littlefair, 1990.



**FIGURA 17** – Luminária solar com lente côncava, iluminando o ambiente de forma difusa e direta, através do uso de lentes lineares. Fonte: Littlefair, 1990.

### 2.6.1.2. SISTEMA DE PRISMAS MOTORIZADOS - “SO LIGHTING”

“SO-LIGHT” (figuras 18, 19, 20, 21 e 22) é um sistema prismático ativo, produzido pelo Departamento de Arquitetura da Universidade de Hong Kong. O sistema, guiado por um computador, permite a entrada e a distribuição uniforme da luz natural, no ambiente interno, durante todo o dia (www.arch.hku.hk, jul/2001). O domo de plástico e os painéis prismáticos minimizam radiação infravermelha e ultravioleta com o objetivo de prevenir ganhos de temperatura.

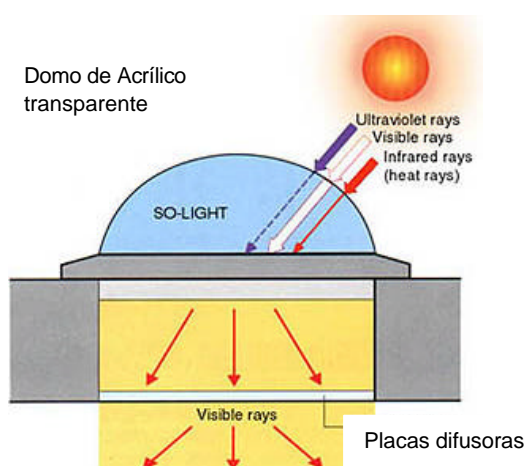


**FIGURA 18** – Esquemas ilustram o melhoramento da distribuição da luz no ambiente interno com a utilização do So-light. Fonte: www.arch.hku.hk - jul/ 2001.

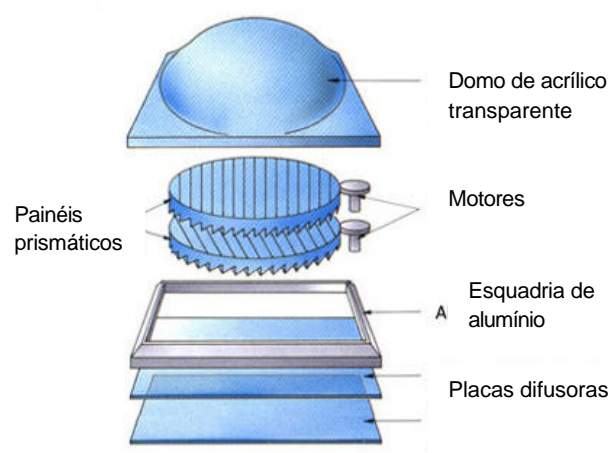


**FIGURAS 19 e 20** – Espaços internos iluminados naturalmente através do So-light. Fonte: www.arch.hku.hk - jul/ 2001.





**FIGURA 21** – Domo transparente filtra a radiação solar, deixando penetrar no ambiente apenas a luz visível. Fonte: [www.arch.hku.hk](http://www.arch.hku.hk) - jul/ 2001.



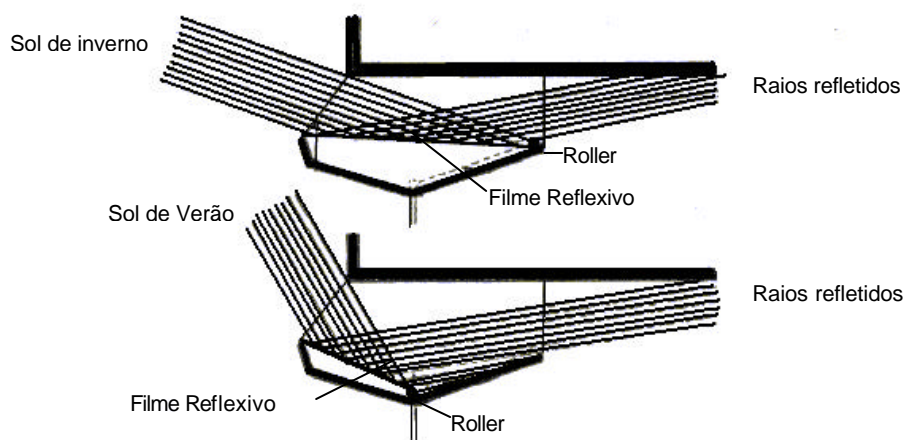
**FIGURA 22**– Esquema mostra os elementos que compõem o So-light. Fonte: [www.arch.hku.hk](http://www.arch.hku.hk) - jul/ 2001.

### 2.6.1.3 VENEZIANAS COM RASTREAMENTO SOLAR

Um outro exemplo de sistema ativo são as venezianas com rastreamento solar. As lâminas da veneziana possuem superfícies brancas ou espelhadas e são programadas para bloquear a luz direta do sol em todos os momentos. Essas venezianas geralmente são instaladas dentro de vidros duplos para evitar a depreciação do sistema (BELTRAN, et al, 1994).

### 2.6.1.4 VALRA - Variable-Area Light-Reflecting Assembly

Este sistema, proposto por Howard e co-autores (1986), ilustrado na figura 23, possui um filme espelhado ligado a um rolete como elemento principal. A posição do rolete varia com as diferentes posições do sol. Isso faz com que o filme refletivo seja exposto à luz direta do sol em áreas e ângulos variados (LITTLEFAIR, 1990).



**FIGURA 23** – Esquema de funcionamento do VALRA. Fonte : [www.fridge.arch.uwa.edu.au](http://www.fridge.arch.uwa.edu.au), jul/2001.

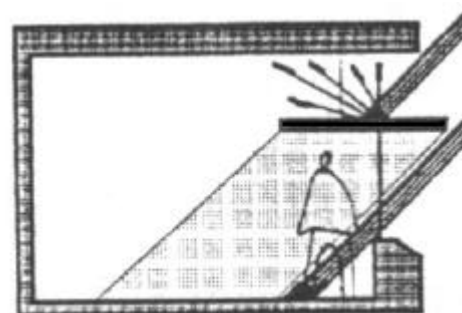
## 2.6.2 SISTEMAS PASSIVOS

### 2.6.2.1 SISTEMAS COM REFLEORES (DIFUSOS) DE LUZ

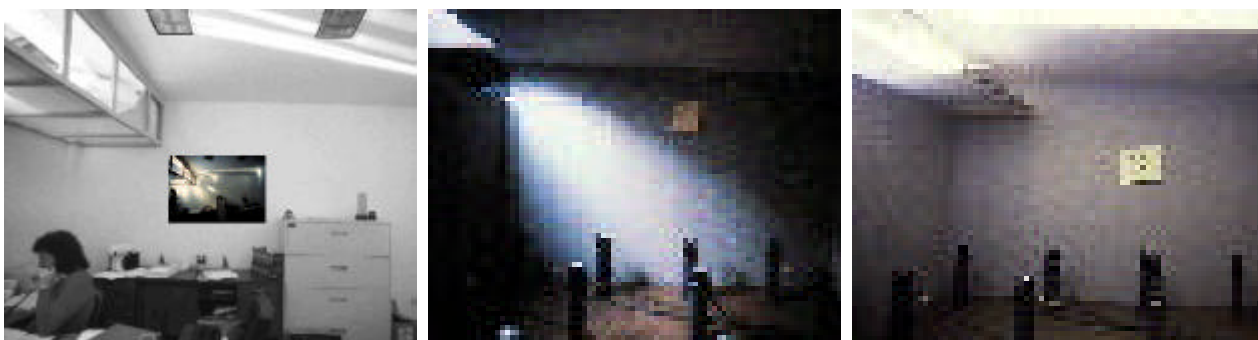
#### 2.6.2.1.1 Prateleira de Luz

Como os vidros prismáticos, a prateleira de luz (figuras 24, 25, 26 e 27) é uma idéia antiga que foi recentemente trazida de volta à moda. Esse sistema é um exemplo de dispositivo passivo, usado para redirecionar a luz do sol para o interior das edificações. É largamente empregada em conjunto com as janelas, e proporcionam sombreamento e controle de ofuscamento.

Pesquisas sobre esse dispositivo foram feitas desde 50, mostrando que a luz natural disponível fica bem distribuída, melhorando as condições visuais, principalmente próximo à janela (LITTLEFAIR, 1995).



**FIGURA 24** – Esquema ilustrativo de funcionamento de uma prateleira de luz.  
Fonte: Pereira, 1993.



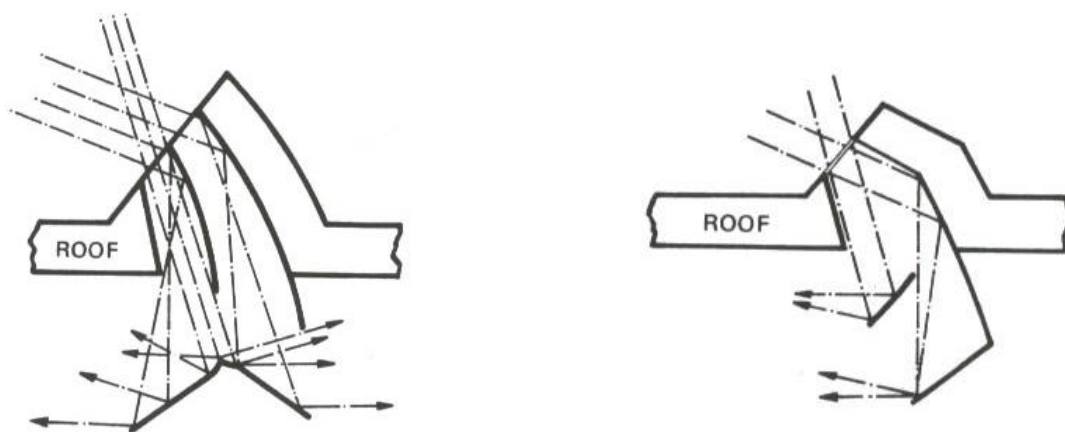
**FIGURAS 25, 26 e 27** – Ilustram a melhora da distribuição da luz no ambiente interno, diante da implantação de uma prateleira de luz. Fonte: [www.windows.lbl.gov](http://www.windows.lbl.gov), jul/2001.

#### 2.6.2.1.2 Sistemas de Iluminação Zenital com Refletores de Luz

A luz, ao passar por esses sistemas, emerge no ambiente de forma difusa e uniforme, sendo essa uma das principais vantagens da utilização dos refletores de luz.

As figuras 28 e 29 ilustram um sistema de iluminação zenital com refletores de luz. Na primeira figura, os refletores de luz estão direcionados para a mesma direção; já na segunda figura, o refletor difunde a luz para os dois os lados.





FIGURAS 28 e 29- Ilustram um sistema de iluminação zenital com refletores de luz. Fonte: Wilcox & Cunningham, 1986.

### 2.6.2.2 SISTEMAS DE REFRAÇÃO DA LUZ

O fenômeno de refração da luz ocorre quando a luz atravessa materiais com índices de refração distintos: a direção do fecho de luz é alterada durante sua trajetória através do material.

*“O principal aspecto negativo deste fenômeno é a distorção das imagens, o que sugere uma integração de porções da janela dedicadas distintamente à iluminação e à visão”* (PEREIRA, 1993; [www.fridge.arch.uwa.edu.au](http://www.fridge.arch.uwa.edu.au), jul/2001).

#### 2.6.2.2.1 Sistemas Prismáticos

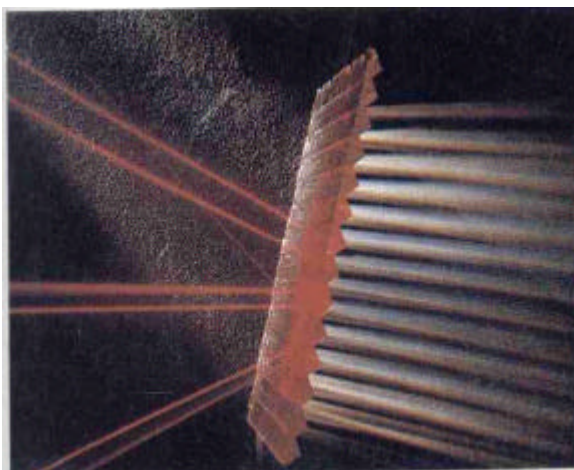
O início da utilização de elementos prismáticos (figuras 30 e 31) para a luz natural se deu em Berlim no início do século XX. A má qualidade da luz elétrica, naquela época, encorajou os pesquisadores a investigarem técnicas que permitissem a penetração da luz natural em espaços profundos (BAKER 1993).

O princípio dos painéis prismáticos é a alteração da direção da luz natural através dos fenômenos da refração e reflexão. Parte da luz incidente defletida por refração pode ser redirecionada para o fundo dos espaços internos. Normalmente, um sistema é formado por duas folhas de painéis prismáticos, com as faces prismáticas voltadas para dentro, para que possam ficar melhor protegidas (LITTLEFAIR, 1990; AIZLEWOOD, 1993; HOLMES, 1988).

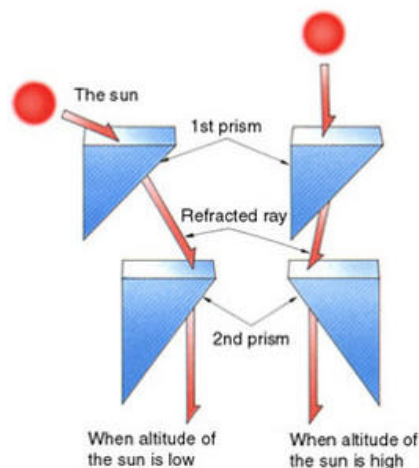
Durante os anos 80 e 90, foram estudados, desenvolvidos e disponibilizados comercialmente novos prismas e refletores estacionários para sistemas de iluminação natural (BOUBEKRI, 1999; CRITTEN, 1986; EDMONDS, 1983; HOLMES, 1988; MOECK, 1998; WHITEHEAD, 1998 (ac)).

As principais vantagens do painel prismático são a não perturbação da aparência geral da janela, quando vista do interior do ambiente e a redução do ofuscamento causada pela vista direta do céu através de janelas convencionais, pois os prismas que excluem a luz direta do sol têm a luminância de 100-300  $\text{cd/m}^2$  comparada com 2000-6000  $\text{cd/m}^2$  para céu encoberto, visto através de uma janela convencional (BAKER, 1993).

No entanto, quando se utilizam painéis prismáticos fixos, a vista do exterior fica sempre obscura e, além disso, o seu custo pode ser consideravelmente alto, quando comparado com os sistemas convencionais.



**FIGURA 30-** Painel prismático. Fonte: Backer, 1993.



**FIGURA 31-** Esquema de redirecionamento da luz, realizado por um prisma. Fonte: Backer, 1993.

Existem basicamente dois tipos de painéis prismáticos: painéis que redirecionam a luz direta do sol e painéis que excluem a luz direta do sol.

#### 2.6.2.2.1.1 Painéis Prismáticos que Redirecionam a Luz Direta do Sol

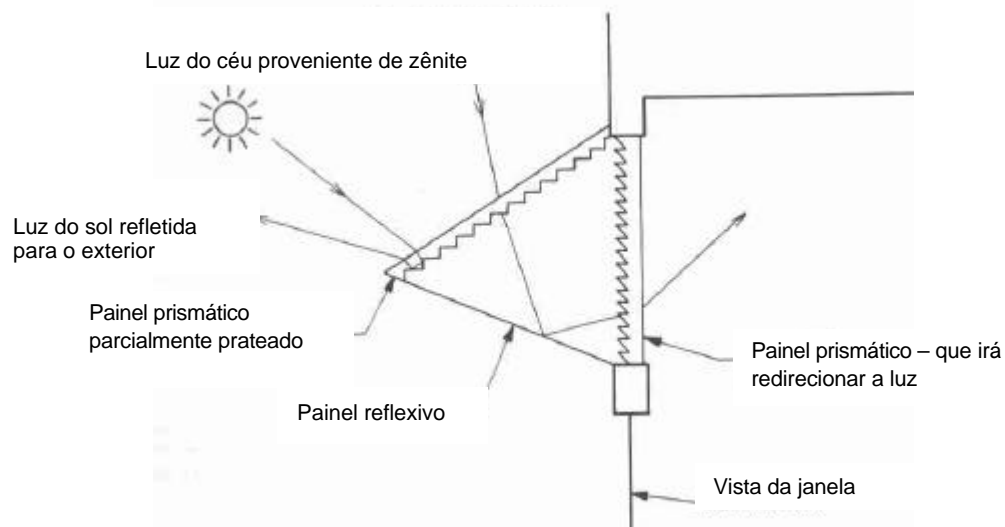
Esse sistema, proposto por Ruck e co-autores, na Austrália durante os anos 70, normalmente, é instalado no interior dos painéis de vidro duplo e localizado na parte superior das aberturas, já que o sistema distorce e obscurece a vista do exterior. (www.fridgr.arch.uwa.edu.au, jul/2001; LITTLEFAIR, 1990).

Ruck também calculou o seu fator de transmissão em torno de 75-85% até 50-70%, (LITTLEFAIR, 1990). Esse sistema também oferece uma eficiência de transmissão da luz de 50 a 70%, dependendo da altura solar. Para a conservação de energia e conforto do usuário, é necessário que os painéis sejam ajustados de acordo com a orientação e a profundidade do ambiente (www.fridge.arch.uwa.edu.au, jul/2001).

#### 2.6.2.2.1.2 Painéis Prismáticos que Excluem a Luz Direta do Sol

Esse sistema foi investigado, durante os anos 80, por C. Bartenbach na Austrália. A sua função principal é rejeitar a luz direta do sol (através da reflexão da luz para o exterior), enquanto admite a luz proveniente do céu, próxima ao zenite, devido à refração da luz nos painéis prismáticos que conduzem a luz para o interior da edificação, como ilustra a figura 32 (BAKER 1993).

Breitfuss (1984) analisou esse tipo de sistema e concluiu que, sob condições de céu encoberto, o sistema admite uma menor quantidade de luz natural do que uma janela composta com vidro simples. No entanto, possui uma distribuição mais uniforme da luz sobre o plano de trabalho. A principal vantagem desse sistema é que quando exposto ao sol, rejeita a luz direta, enquanto admite a entrada da luz difusa proveniente do céu; o mesmo não ocorrendo com a maior parte dos protetores solares que bloqueiam tanto a luz direta quanto a luz difusa.



**FIGURA 32** – Esquema ilustrativo de funcionamento de um sistema constituído por painéis prismáticos que excluem a luz direta do sol. Fonte: Littlefair, 1990.

#### 2.6.2.2.2 Painéis Cortados a Laser (PCL)

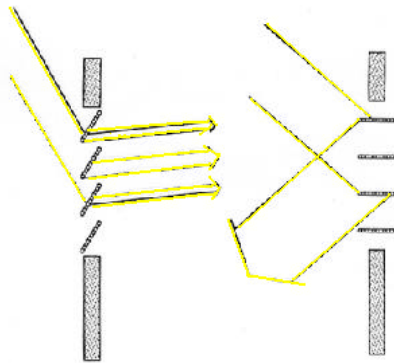
O PCL (figuras 33 e 34) é composto por um painel de acrílico, plano e transparente, onde é feita, através de uma técnica de cortes por raio laser, uma série de cortes bem finos no sentido da largura do painel. O laser corta, fundindo o material e produzindo superfícies internas altamente refletivas, que redirecionam a luz direta do sol para o teto do ambiente (EDMONDS, et al, 1995; EDMONDS, et al, 1997; [www.qu.edu.au](http://www.qu.edu.au), jul/2001; [www.fridgr.arch.uwa.edu.au](http://www.fridgr.arch.uwa.edu.au), jul/2001).



**FIGURAS 32 e 34** – Implantação de painéis cortados a laser em aberturas laterais. Fonte: [www.fridgr.arch.uwa.edu.au](http://www.fridgr.arch.uwa.edu.au), Jul/2001.

### 2.6.2.2.1 Abertura Lateral Composta com Painéis Cortados a Laser

Uma possibilidade de utilização desse sistema seria a montagem de painéis na forma basculante (figura 35) ou na parte superior das aberturas (figura 36). Dessa forma, pode-se fazer um controle mais efetivo da transmissão da luz solar, evitando que a luz direta redirecionada atinja o nível dos olhos dos usuários. Vale salientar que a transparência entre os cortes é mantida num nível bem razoável, permitindo a visão através do painel (PEREIRA, 1993; [www.fridgr.arch.uwa.edu.au](http://www.fridgr.arch.uwa.edu.au), jul/2001).



**FIGURA 35-** Painel cortado a laser, montado na forma de basculante. Fonte: [www.fridgr.arch.uwa.edu.au](http://www.fridgr.arch.uwa.edu.au), jul/2001.



**FIGURA 36 –** Painel cortado a laser, colocado em uma janela alta. Fonte [www.qut.edu.au](http://www.qut.edu.au), jul/2001.

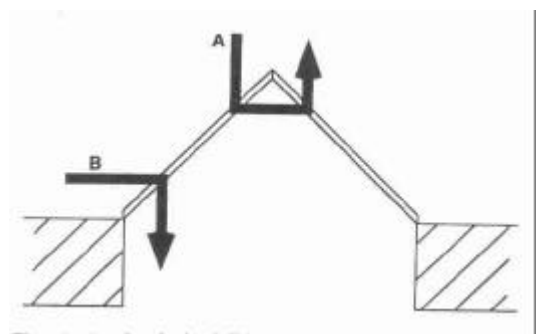
### 2.6.2.2.2 Abertura Zenital Composta com Painéis Cortados a Laser

Esse sistema (figura 37) realiza uma seleção angular, visando a uma otimização de recepção e redirecionamento dos raios solares, de forma a evitar um dos maiores problemas desse tipo de abertura – o aquecimento excessivo do ambiente interno.

É constituído por pirâmides, compostas por quatro painéis de deflexão de luz, cortados a laser. Sua principal função é rejeitar a luz do sol proveniente de alturas elevadas e aceitar a luz proveniente de alturas mais baixas, como ilustra a figura 38. O sistema foi projetado para não reduzir, de forma demasiada, a transmissão da luz difusa e minimizar a transmissão da luz direta do sol. Dessa forma, acredita-se que o sistema é ideal para regiões de baixas latitudes (EDMONDS, 1995; MOECK, 1998; [www.qut.edu.au](http://www.qut.edu.au), jul/2001).



**FIGURA 37 –** Foto do sistema zenital, formado de 4 painéis cortados a laser, em forma de pirâmide. Fonte [www.qut.edu.au](http://www.qut.edu.au), jul/2001.



**FIGURA 38-** Esquema do redirecionamento da luz, de acordo com a altura solar. Fonte: MOECK, 1998.

A luz incidente em uma face da pirâmide, proveniente de alturas mais elevadas, é refratada para a face oposta, onde, na seqüência, continua sendo refratada, só que, agora, para fora da edificação. Em contrapartida, a luz proveniente de baixas elevações é refratada para baixo, atingindo o espaço interior através da abertura zenital.

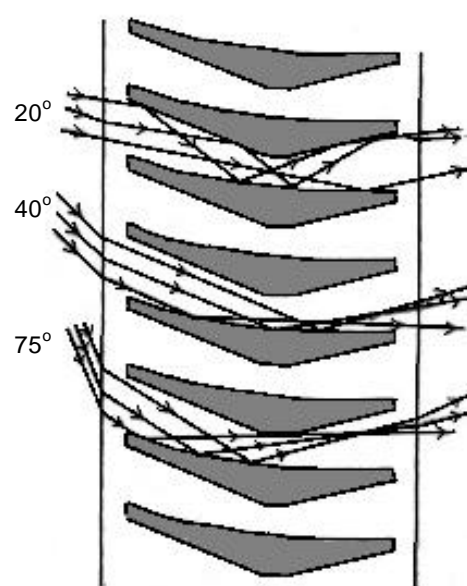
Resultados experimentais, de acordo com Edmonds (1997), indicam que esse tipo de sistema aumenta a iluminância interna em cinco vezes, em condições de céu encoberto e por volta de 3 vezes, em condições de céu limpo – para um dado experimento.

### 2.6.2.2.3 Sistemas de Reflexão Interna Total

Esse sistema consiste de um painel formado por vários elementos que possuem uma base curva e uma superfície superior em forma de V. As seções são montadas de acordo com a figura 39, deixando uma câmara de ar no meio. A forma das superfícies superior e inferior foram definidas de modo a direcionar a luz incidente para cima (COWLING 1990).

Como se pode notar na figura 37, o sistema proposto tem condições de trabalhar com a luz solar com ângulos de incidência que variam entre  $20^\circ$  e  $70^\circ$ , não havendo a necessidade de ajustes constantes. Assim, qualquer raio que penetre no sistema entre esses ângulos irá emergir no ambiente, aproximadamente na horizontal, não maior que um ângulo de  $40^\circ$ . A parte crítica do projeto é a curvatura da base da seção, pois esta permite que o dispositivo trabalhe diante dessa grande variedade de ângulos de incidência.

Para a maior parte das aplicações, é aconselhado que o sistema seja colocado na parte superior da janela, visto que o sistema não é uniformemente transparente e podem ocorrer distorções da vista do exterior.

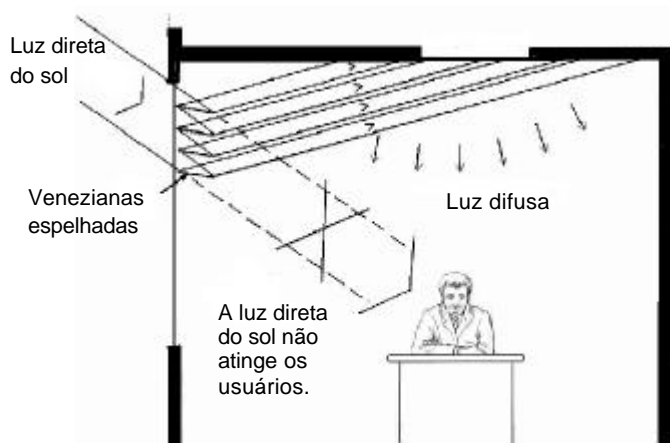


**FIGURA 39** – Elementos sólidos montados para formar um painel, com simulação dos raios de luz do sol. Fonte: PEREIRA, 1993.

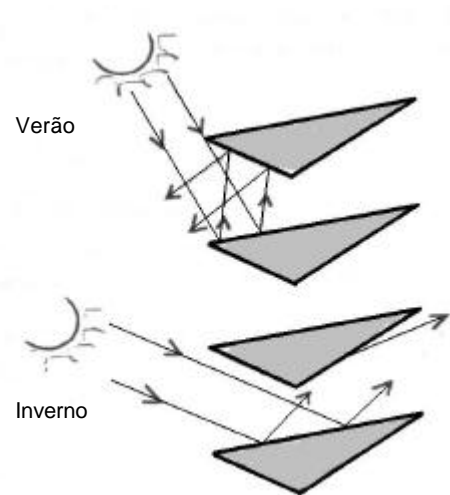
### 2.6.2.3 SISTEMAS ESPELHADOS

#### 2.6.2.3.1 Venezianas Espelhadas

Certamente a maneira mais fácil e simples de redirecionar a luz colimada é através de espelhos, superfícies refletoras especulares. Embora as venezianas tenham sido criadas para o sombreamento, exclusão da luz direta do sol e controle do ofuscamento, as venezianas espelhadas se tornaram um exemplo típico de sistema passivo de redirecionamento da luz do sol.



**FIGURA 40** - Deflexão da luz solar através de venezianas espelhadas. Fonte: [www.fridge.arch.uwa.edu.au](http://www.fridge.arch.uwa.edu.au), jul/ 2001



**FIGURA 41**- Venezianas externas de seção triangular. Fonte: PEREIRA, 1993.

A figura 40 mostra um exemplo típico de venezianas espelhadas, barrando a luz direta do sol sobre os ocupantes e redirecionando-a para o teto do ambiente, de onde vai ganhar qualidade difusa. A sua principal vantagem seria o melhoramento da penetração da luz natural em espaços profundos.

*“A partir do sistema das venezianas horizontais, surgiam as venezianas de seção triangular (figura 41), que facilitam e melhoram o controle da admissão e exclusão da luz solar durante os períodos de verão e inverno”* (PEREIRA, 1993).

A principal desvantagem da veneziana fixa é que ela apenas trabalha, de forma otimizada, em uma determinada altura solar, em particular. Nas demais alturas, nem toda a luz será refletida para o teto e pode ser uma fonte de ofuscamento em potencial.

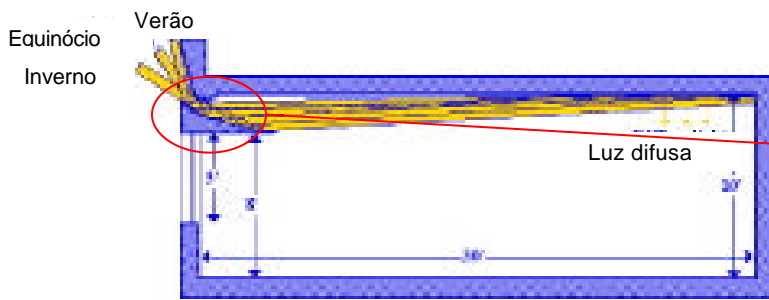
Assim, refletores móveis são normalmente recomendados, mesmo sabendo que não pode ser esperado que os ocupantes ajustem as venezianas de forma otimizada (LITTLEFAIR, 1990).

#### 2.6.2.3.2 Prateleira de Luz Curvada e Revestida com Película Reflexiva

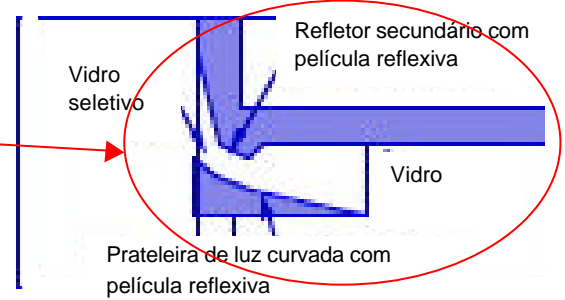
Na figura 42, pode-se perceber que o principal elemento do sistema consiste em um refletor de superfície curvada, concebido para melhor redirecionar a luz do sol, diante das variações da altura solar. A sua superfície é revestida por um filme altamente reflexivo (88%) (BELTAN, 1997).

Acima do refletor principal, localiza-se um refletor secundário, como ilustra a figura 43, também revestido por um filme reflexivo (95%), posicionado no plano do teto próximo à abertura, com a função de interceptar a grande quantidade de raios do sol baixo do inverno e redirecioná-los para o refletor principal (BELTAN, 1997).





**FIGURA 42-** Prateleira de luz curva, revestida com película reflexiva. Fonte [www.windows.lbl.gov](http://www.windows.lbl.gov), Julho/2001.



**FIGURA 43-** Detalhe da prateleira de luz. Fonte [www.window.s.lbl.gov](http://www.window.s.lbl.gov), Julho/2001.

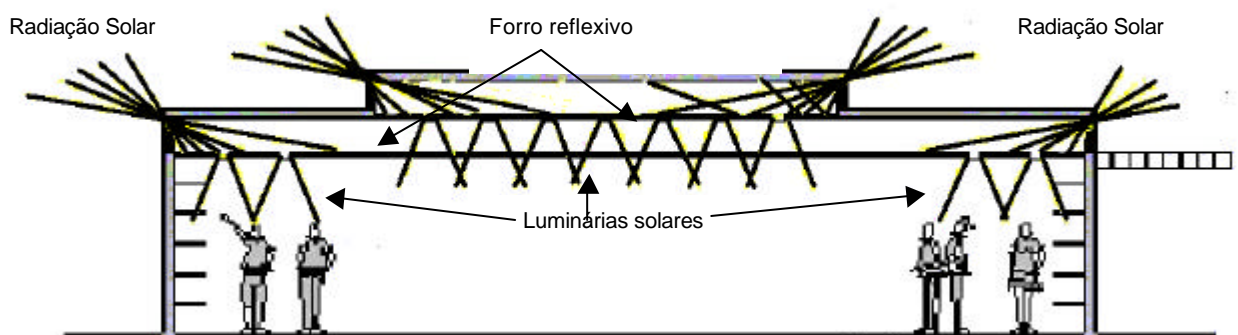
### 2.6.2.3.3 Parapeitos e Conchas Reflexivas

Os parapeitos e as conchas reflexivas são dispositivos de iluminação natural relativamente simples e baratos. A luz do sol que atinge o parapeito é redirecionada para o teto de onde é refletida para as áreas de trabalho. O ofuscamento seria o maior problema encontrado, pois, em certas circunstâncias, a luz do sol pode ser refletida diretamente nos olhos dos ocupantes.

Thomas et al instalaram um parapeito reflexivo em uma escola próxima a Nova York e constataram que, devido ao ofuscamento causado em alguns minutos no início da manhã, a professora cobriu o parapeito com papel (LITTLEFAIR 1990). Por causa do problema com o ofuscamento, Lam mostra-se contra qualquer refletor localizado abaixo do nível dos olhos dos ocupantes sentados.

### 2.6.2.3.4. Forro Iluminante

O chamado forro iluminante (figura 44) consiste de um forro composto por material reflexivo e luminárias solares. A luz penetra através de janelas altas e, após atingir o forro, sofre uma série de reflexões até ser transmitida ao ambiente, através das luminárias solares, como mostra a figura 42.

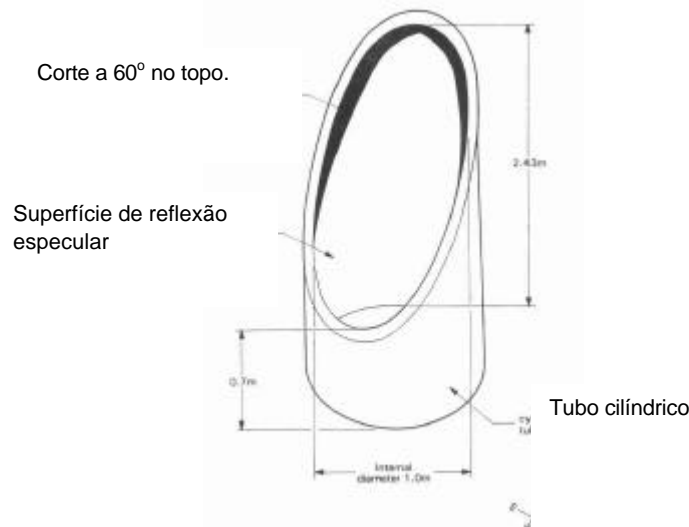


**FIGURA 44-** Esquema de um forro iluminante com luminária solar.

### 2.6.2.3.5 Abertura Zenital com Duto de Luz

O sistema (figura 45) consiste basicamente em um cilindro, com superfícies espelhadas, com um corte de 60° no topo, vedado com vidro, onde a face inclinada fica voltada para o Norte. Estudos

fotométricos revelaram uma simetria radial de iluminâncias abaixo do dispositivo zenital. E o “Daylight Factor” varia de 3,5% - abaixo da abertura e 1% em uma área mais afastada.



**FIGURA 45-** Esquema do sistema zenital formado por um cilindro espelhado. Fonte: Littlefair, 1990.

#### 2.6.2.4 SISTEMAS DE LENTES

Diferentemente dos sistemas prismáticos que mantêm os raios de luz paralelos, os sistemas com lentes têm sido propostos por fazerem os raios de luz convergirem ou divergirem (LITTLEFAIR, 1990; WHITEHEAD, 1998b).

Lemons (1983) investigou em maquetes esse tipo de sistema. Ambas as lentes, com focos curtos positivos (convergentes) e negativos (divergentes) atingiram o efeito desejado de espalhar a luz do sol sobre uma área mais larga. No entanto, as lentes positivas são menos aconselhadas devido à reprodução da imagem real do sol dentro do espaço, o que pode vir a queimar papéis, madeira ou os próprios ocupantes.

#### 2.6.2.5 ELEMENTOS HALOGRÁFICOS

Esse sistema (figuras 46, 47, 48 e 49) tem como elemento principal filmes óticos halográficos (HOEs) que, aplicados em um vidro comum, redirecionam a luz por difração (LITTLEFAIR, 1990).

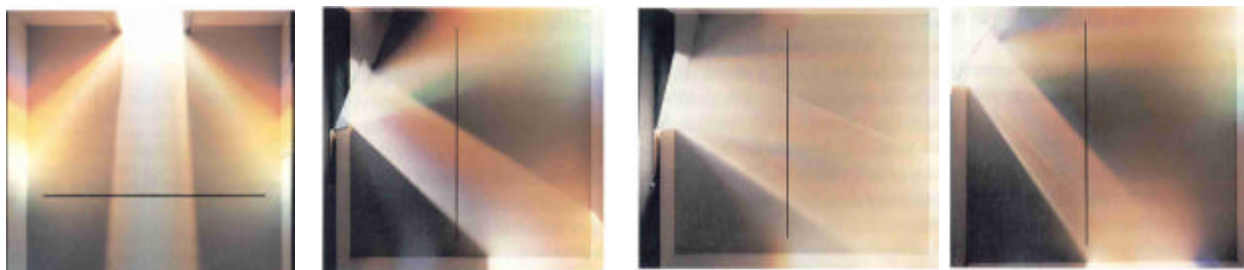
A performance dos HOEs para luz difusa é muito pobre, devido ao fato de as ondas de luz difusa não possuírem uma direção específica. Porém, possui grande potencial para redirecionamento da luz direta do sol, visto que a película HOEs pode ser um dispositivo combinado de proteção e redirecionamento da luz solar. No entanto, vale salientar que, em certos ângulos de visão, é criado um efeito de arco-íris (BAKER 1993).

Existe um grande potencial para a aplicação de HOEs em edifícios para o melhoramento do ambiente luminoso. Algumas vantagens desse material são:

- após a sua aplicação, mantém a aparência convencional da abertura;



- é um sistema passivo que protege do sol (sombreamento) ao mesmo tempo em que admite a entrada da luz difusa;
- pode ser aplicado em qualquer tipo de vidro;
- o sistema ainda está em corrente desenvolvimento.



**FIGURAS 46, 47, 48, e 49** – Performance luminosa de diferentes películas HOEs, sob incidência do sol em ângulos variados. Fonte Backer, 1993.

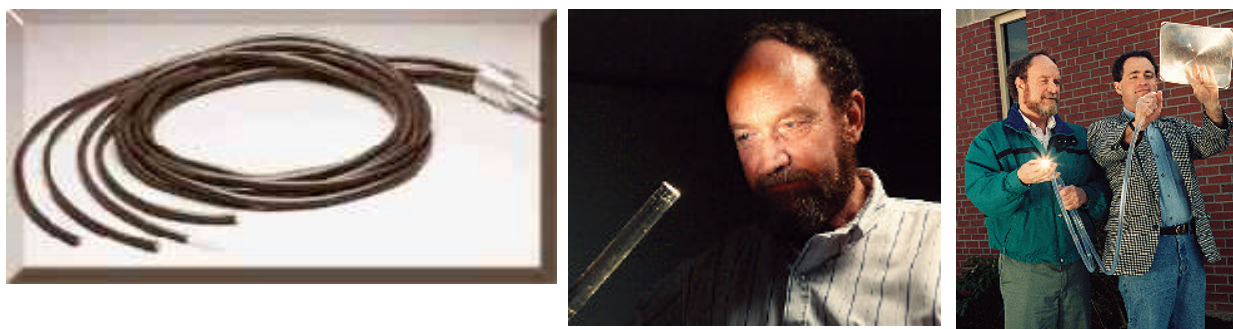
#### 2.6.2.6 FIBRA ÓTICA

Novos e excitantes desenvolvimentos em técnicas de condução da luz direta do sol estão no horizonte. Pesquisas recentes em fibra ótica podem preparar o caminho para a demonstração da nova concepção de sistema de iluminação energeticamente eficiente para edificações (HAYMAN, 1990; KRIBUS, 2000; 1990; SARAIJI, et al, 1996; WILCOX & CUNNINGHAM, 1986).

No entanto, a aplicação de fibra ótica para luz natural ainda tem que ser desenvolvida. Uma das suas grandes vantagens seria a redução da transmissão do calor no espaço iluminado, devido ao fato se esse sistema transmitir apenas o comprimento de onda visível da luz.

Além disso, a sua flexibilidade permite que ela seja curvada e pode ser separado em vários braços. Para utilização dessa tecnologia dentro dos dutos de luz, por exemplo, os feixes podem ser simplesmente dobrados e redirecionados para o espaço a ser iluminado.

Já existe uma produção comercial de fibra para comunicação a baixo custo, poucos centavos por um metro linear. Entretanto, fibras adequadas a aplicações solares têm um diâmetro maior e baixa atenuação, implicando um custo muito mais alto (KRIBUS, et al 2000).



**FIGURAS 50, 51 e 52**– Fotos de feixes de luz conduzidos através de fibras óticas. Fonte: [www.ornl.gov](http://www.ornl.gov), jul/2001

### 2.6.3 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO PARA SISTEMAS QUE UTILIZAM A LUZ DIRETA DO SOL

Antes de projetar, ou implantar qualquer sistema de iluminação natural, que utilize a luz direta do sol, o arquiteto terá que justificar de forma clara tal investimento. Segundo Pereira (1993), para que se possa escolher o tipo de sistema a ser adotado, devem-se considerar as seguintes questões:

- se o sistema vai ser implantado em locais que exigem condições especiais de iluminação – escolas, museus, sala de computação;
- se existem grandes obstruções externas;
- se existem fachadas com acesso direto ao ambiente externo;
- qual a disponibilidade de luz direta do sol nas aberturas;
- qual a profundidade do ambiente;
- qual a geometria do espaço - observar se existem divisórias, que podem causar áreas sombrias;
- qual o comportamento térmico do sistema – observar se conduz calor de forma demasiada.

Pereira (1993) e Littlefair (1990) reforçam, afirmando que, caso seja escolhido um dos sistemas inovativos de iluminação natural, devem-se ainda observar algumas considerações finais:

- sistemas que utilizam apenas a luz direta do sol parecem ser inapropriados para locais onde existe grande frequência de céu encoberto e com baixos índices de iluminância externa;
- o sistema deve:
  - apresentar uma elevada transmitância à luz natural e relativamente baixa transmitância à parte não visível do espectro solar, que pode incrementar os ganhos térmicos no ambiente interno;
  - ser capaz de iluminar o ambiente durante grande parte do dia;
  - utilizar estratégias de projeto que proporcionem maior uniformidade da distribuição da iluminação interna;
  - ser adequado a todas as posições do sol.
- também devem-se considerar:
  - teto como um importante elemento refletor secundário e difusor. É importante observar também que a maior parte dos sistemas laterais requer um teto razoavelmente alto;
  - a integração do sistema de iluminação natural com o sistema de iluminação artificial, ou seja, é requerido um bom controle para a luz elétrica;
  - as condições de manutenção e exposição externa do sistema. Prateleiras de luz espelhadas e sistemas envidraçados coletam poeira e sujeira; assim, para manter a eficiência dos sistemas, eles devem ser limpos com a mesma frequência das janelas convencionais;
  - custo. Geralmente os sistemas de iluminação natural fixos, que são uma continuação dos sistemas de sombreamento, são mais baratos do que os sistemas controlados por computador ou que possuem componentes com sistemas óticos precisos.

➤ não deve ser esperado que os ocupantes ajustem o sistema de iluminação natural diariamente - estudos com venezianas mostram que raramente os dispositivos de sombreamento são ajustados (LITTLEFAIR, 1990). Caso os sistemas necessitem ser móveis, é aconselhado que o controle seja feito automaticamente ou ajustado por funcionários em poucas situações críticas no ano.

## 2.7 RESFRIAMENTO PASSIVO NO NORDESTE DO BRASIL

O clima quente e úmido geralmente é encontrado em países próximos da linha do equador, como no Nordeste do Brasil. Nessa zona, a temperatura dificilmente ultrapassa os 32°C, mas a umidade é muito elevada, resultando em um enorme desconforto devido à dificuldade de perda do calor do corpo através da evaporação do suor, fato que não ocorre nas zonas secas onde as temperaturas são mais altas, mas a umidade é baixíssima.

Nesse clima, geralmente, existem apenas duas estações bem definidas. O verão, quando ocorrem as temperaturas altas e chove pouco e o inverno, quando a temperatura cai um pouco e chove muito, aumentando a taxa de umidade do ar.

A luz do sol é muito forte e o nível de iluminação natural é alto, com ou sem nuvens, embora o céu possa parecer cinzento quando a nebulosidade é alta. Normalmente, os ventos vêm com velocidade muito limitada, o que não impede que essa seja uma região marcada pelas tormentas. Quando os ventos são fortes, podem acontecer aguaceiros quase horizontais.

O problema mais grave a ser resolvido no clima quente e úmido é o conflito entre luz e calor proveniente da radiação solar, visto que qualquer ganho térmico pode significar desconforto para os usuários.

Em um projeto de edificações para esse clima seria importante antes de aplicar qualquer técnica de resfriamento, evitar os ganhos térmicos (SZOKOLAY, 1987). Cobertas, janelas, portas, aberturas e alvenaria são os caminhos mais vulneráveis para a energia solar penetrar no interior da edificação. A necessidade de um sombreamento criterioso e eficiente, a aplicação de revestimento de boa refletância, além de materiais que geram um bom isolamento são importantes para manter uma redução no impacto da radiação solar.

A sombra é um dos mecanismos mais eficazes para combater o desconforto térmico causado pela radiação. A cobertura deve funcionar como um verdadeiro guarda-sol. Do mesmo modo que todas as aberturas, as janelas precisam de um sistema que controle a entrada direta do sol. No entanto, o sombreamento excessivo interfere significativamente no rendimento da iluminação natural e, consequentemente, desperdiça sua alta eficiência energética (BITTENCOURT, 1993).

É de extrema importância reduzir a carga térmica interna proveniente do fluxo luminoso, particularmente aquele proveniente de sistemas elétricos, visto que a luz do sol apresenta maior eficiência quando comparada com a maior parte das fontes de luz artificial.

De acordo com Lam (1986), a integração da luz solar direta (inserida em pequenas proporções) com o projeto das aberturas, ao invés de sua simples rejeição, pode garantir uma boa quantidade de luz e proporcionar ambientes com ganhos térmicos reduzidos.

Além das técnicas para conseguir boa sombra, a ventilação é outra prioridade que se deve ter quando se trata de um projeto para o tipo de clima quente e úmido (BITTENCOURT, 1993).

As características mais notáveis da arquitetura tradicional nessa região são influenciadas pela ventilação. O projeto é feito de modo a aproveitar qualquer brisa, utilizando balcões, tetos altos, janelas grandes, varandas, dentre outros. O resultado é uma construção de colunas e vigas e demais materiais com pouca inércia térmica.

A velocidade de circulação do ar, especialmente nas zonas onde se encontram as pessoas, no interior da habitação, é uma das variáveis mais importantes do conforto térmico em regiões quentes e úmidas.

Em climas quentes, o movimento de ar pode ser usado para dois propósitos complementares. O primeiro é resfriar a estrutura da edificação, aquecida pela radiação solar e ganhos internos (ocupação, iluminação, etc.) onde altas taxas de ventilação podem trazer a temperatura interna para próximo dos níveis externos. O segundo é o resfriamento fisiológico, referindo-se ao efeito produzido pela evaporação do suor e trocas de calor por convecção, quando correntes de ar estão em contato com o corpo humano. Isso é em função principalmente da velocidade e da temperatura do ar, mas também dependem dos padrões de fluxo de ar e da umidade relativa da corrente de ar. O resfriamento fisiológico é particularmente importante em regiões úmidas, pois *“a pele úmida é sempre a principal fonte de desconforto”* (COOK, 1989).

Segundo Evans (1991), a sensação de refrescamento acarretada pela ventilação equivale a diminuir aproximadamente 2°C de temperatura. Porém, quando a temperatura externa é superior aos valores internos do ambiente (não sendo este o caso da região em estudo), a ventilação pode produzir um aumento da temperatura interna, tornando desaconselhável o seu uso nessa situação.

A ventilação requerida em épocas de calor depende das demais variáveis do ambiente, pois, em termos de conforto térmico, o que importa é a dissipação do calor que o organismo está produzindo e o que, eventualmente estará recebendo do meio por um dos processos de transmissão. Segundo Bedford (1948), um mínimo de velocidade do ar, no limiar da percepção pelas pessoas, é necessário para evitar a sensação de abafamento. Essa velocidade mínima é da ordem de 0,15m/s, quando a temperatura do ar é de 12°C, subindo a 60 cm/s quando a temperatura atinge 30°C.

Sempre que o vento está constante em direção e intensidade (3m/s), a ventilação é a estratégia de condicionamento do ambiente mais simples. Contudo, o vento torna-se consideravelmente indesejável se a temperatura estiver acima de 34°C.

As características gerais do clima regional, em particular a disponibilidade de razoáveis velocidades do ar, colocam a ventilação como a estratégia mais apropriada para a região, especialmente em habitações e outras edificações de uso contínuo o dia inteiro.

## 2.8 CONCLUSÃO

Este capítulo mostrou uma visão geral a respeito de sistemas de aberturas. Foi abordado desde um breve histórico, aspectos relevantes ao projeto de sistemas de abertura, sistemas inovativos que utilizam a luz direta do sol para a iluminação natural, até o controle da radiação solar para o Nordeste do Brasil.

Diante da diversificação e da polifuncionalidade dos sistemas de iluminação natural, a escolha de que sistema utilizar se dá em função de quatro grupos de considerações: estética, funcionalidade, desempenho energético e custo. Essas considerações são, muitas vezes, conflitantes em termos da otimização do projeto de aberturas.

Os sistemas de aberturas mais simples (abertura lateral e zenital com vidro simples) distribuem a luz de forma irregular, causando ofuscamento, superaquecimento nos locais próximos da abertura, um aumento significativo no consumo de energia na edificação.

Como alternativa para melhorar o conforto e a eficiência energética na edificação, foram apresentados alguns sistemas que utilizam pequenas quantidades de luz solar direta para a realização de iluminação natural no ambiente interno. Esses sistemas dosam e distribuem melhor a luz no ambiente, equilibrando, assim, a admissão de luz e calor.

O controle da luz direta do sol também pode ser uma solução para o problema de introdução da luz natural em espaços internos profundos e também pode contribuir para o melhoramento do balanço do brilho do espaço, relativo à vista da janela.

Também é aconselhada a utilização desses sistemas em locais onde o conflito entre a luz e o calor são mais intensos, como no Nordeste do Brasil. Nessa região, as aberturas são geralmente sombreadas com dispositivos de sombreamento, muitas vezes inadequados, o que interferem significativamente no rendimento da iluminação natural e, conseqüentemente, desperdiça sua alta eficiência energética.

No próximo capítulo, será abordada uma metodologia para análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol, uma vez que ainda não foram divulgados padrões que estabelecem as condições de ganho de calor solar provenientes da maior parte desses sistemas, considerados uma técnica em potencial para a conservação de energia.

---

## Capítulo 3

---

# Metodologia

<b>3 Metodologia.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Definição dos Sistemas de Iluminação Natural a serem Analisados.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.1 Critérios de Seleção dos Sistemas de Iluminação Natural .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.2 Seleção dos Sistemas de Iluminação Natural.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Metodologia para Medição Térmica e Luminosa .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.1 Metodologia para Medição dos Níveis de Iluminância do Ambiente Interno.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.1.1 Modelos Reduzidos para Medição da Luz Natural.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1.1.1 Descrição dos Modelos em Escala.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1.1.2 Localização dos Modelos e Orientação das Aberturas.....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1.2 Medição dos Níveis de Iluminação.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.1.2.1 Fotocélulas.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.1.2.2 Datalogger Li-250 Light Meter da Li-Cor.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.1.2.3 Fontes de Erro.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.2 Metodologia para Quantificação do Fluxo de Calor que Atravessa os Sistemas de Abertura.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.2.1 Desenvolvimento do Radiômetro de Abertura .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3.2.1.1 Descrição dos Transdutores de Fluxo de Calor.....</b>	<b>68</b>
<b>3.4 Descrição Geral do Experimento.....</b>	<b>76</b>
<b>3.5 Considerações finais .....</b>	<b>80</b>

### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve as técnicas experimentais utilizadas para avaliação do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural.

O desempenho das aberturas, com relação à admissão de energia solar e o ambiente luminoso interno resultante, é um entre muitos conflitos encontrados quando se busca a otimização do projeto de aberturas. Esse conflito se intensifica em regiões de baixa latitude, onde pequenos acréscimos na temperatura podem significar desconforto para os usuários.

No entanto, para que se possam projetar edificações visando à otimização do consumo de energia elétrica, através do aproveitamento da luz natural e seus efeitos térmicos associados, faz-se necessária a utilização de informações, precisas e confiáveis, a respeito do desempenho térmico e luminoso dos sistemas de abertura.

A falta e/ou a imprecisão desses dados podem gerar soluções de projetos inadequados, uma vez que soluções dedicadas ao aproveitamento da luz natural geralmente apresentam riscos potenciais de superaquecimento e ofuscamento, enquanto dispositivos dedicados à obstrução da radiação solar direta podem reduzir significativamente o rendimento da iluminação natural.

Na metodologia descrita neste capítulo, foram definidos os sistemas de iluminação natural a serem analisados, os mecanismos e equipamentos selecionados para aquisição dos dados térmicos e luminosos.

O objetivo desse experimento é gerar subsídios para elaboração de diretrizes de projeto que auxiliem na formulação de sistemas de iluminação natural eficientes, ou seja que controle a radiação solar de forma a redirecioná-la e introduzi-la em pequenas quantidades suficientes para a iluminação do ambiente interno, evitando problemas com ofuscamentos e ganhos térmicos excessivos.

### 3.2 DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL A SEREM ANALISADOS

Sabe-se que este trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural, que utilizam a luz direta do sol, a fim de verificar a sua adequação a uma dada latitude ou condição climática.

Antes de selecionar os sistemas de iluminação natural a serem analisados, houve a necessidade de caracterizá-los. Este trabalho irá caracterizar os sistemas de acordo com Baker (1993).

Essa classificação busca viabilizar a análise do comportamento radiante individual de cada componente/elemento, com o objetivo final de permitir a interpretação do componente global e possível combinação. Sem a pretensão de cobrir todas as possibilidades, o objetivo é o de classificar os casos mais gerais.

**→ COMPONENTES DE CONDUÇÃO**

Na sua configuração mais simples, é o próprio espaço que serve de guia e distribuição da luz no espaço interno. É analisado de acordo com suas características geométricas: tamanho, localização e forma.

**➤ Espaços iluminados intermediários**

São parte de zona perimetral da edificação, direcionam e distribuem luz natural aos espaços internos contíguos. Como exemplo, pode-se citar as galerias abertas, as galerias fechadas, as estufas, dentre outros.

**➤ Espaços iluminados intermediários**

São parte do ambiente interno, direcionam e distribuem luz natural para espaços específicos sem acesso direto ao exterior. Como exemplo, podemos citar os pátios, átrios poços ou dutos de luz, dutos de luz solar direta e outros.

**→ COMPONENTES DE PASSAGEM**

São elementos que permitem a passagem da luz de um ambiente iluminado para outro, sendo a abertura o exemplo mais comum. São analisados de acordo com suas características geométricas: tamanho, localização e forma. A esses componentes ainda podem ser incorporados os elementos de controle.

**➤ Componentes de passagem lateral**

Estão localizados em superfícies verticais do envoltório, admitindo penetração de luz natural. Como exemplo, pode-se citar as janelas, as sacadas sem cobertura, as paredes translúcidas móveis e fixas, entre outros.

**➤ Componentes de passagem zenital**

Localizados, em geral, na cobertura, permitindo penetração de luz zenital ao espaço situado a abaixo. Como exemplo, pode-se citar as janelas de cobertura, os lanternins, as coberturas translúcidas, os domos entre outros.

**→ Elementos de Controle**

Abrangem dispositivos de regulação da admissão de luz nos ambientes internos. São analisados de acordo com a sua localização, mobilidade e propriedades óticas:

- transparência
- difusão
- redirecionamento

**➤ Superfícies de separação**

Elementos transparentes ou translúcidos que admitem luz sem admitir a passagem do ar, podem ou não prejudicar a visão. Como exemplo, pode-se citar os vidros, policarbonatos, acrílicos, prismas entre outros.



#### ➤ Telas flexíveis

Elementos móveis que proporcionam a obstrução total ou parcial da luz direta do sol e da abóbada celeste. Como exemplo, pode-se citar os toldos, as cortinas e outros.

#### ➤ Telas rígidas

Elementos opacos que obstruem e/ou redirecionam a luz direta, que incide sobre a abertura, são normalmente fixos, sem regulagem. Como exemplo, pode-se citar os beirais, as prateleiras de luz, os para-ventos, os brises verticais entre outros.

#### ➤ Filtros solares

Elementos que cobrem totalmente a abertura, protegendo o ambiente interno da radiação direta do sol, podem ser fixos ou móveis. Como exemplo, pode-se citar os elementos vazados, as venezianas, persianas internas e outros.

#### ➤ Proteções solares

Elementos opacos, ajustáveis, que cobrem toda a área da cobertura. Como exemplo, podem ser citados os fechamentos tampões.

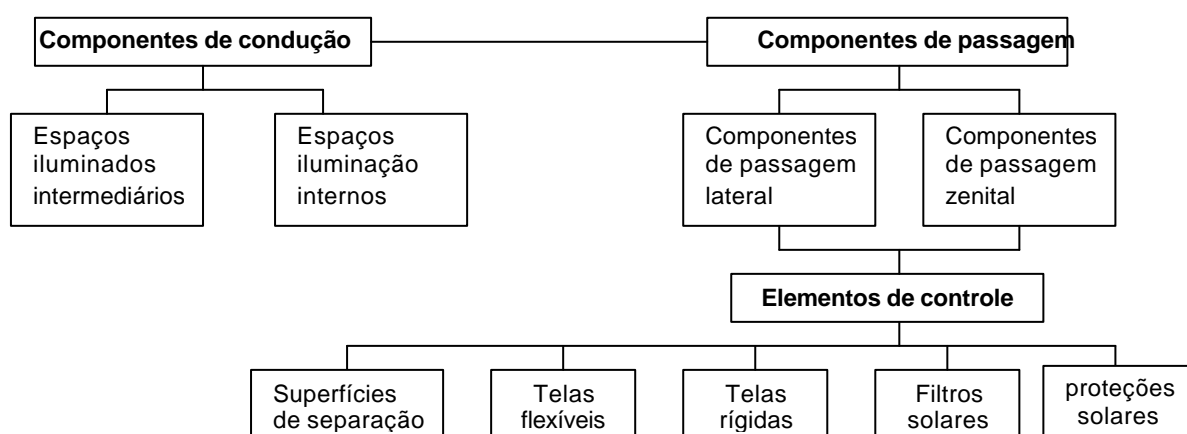


FIGURA 53 – Organograma de caracterização dos sistemas de iluminação natural, segundo Baker (1993).

### 3.2.1 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Foram selecionados sistemas de abertura lateral e zenital, a serem analisados térmica e luminosamente, de acordo com os seguintes aspectos:

#### ® Ser passivo

Faz-se necessário que os sistemas escolhidos sejam compostos por materiais de baixo custo e que estejam disponíveis no mercado. Dessa forma, pretendem-se analisar apenas sistemas de iluminação natural passivos, visto que, atualmente, os sistemas ativos ainda são muito caros e exigem manutenção frequente.

**® Ser fixo**

Serão escolhidos preferencialmente sistemas fixos, pois, embora os sistemas móveis sejam mais eficientes, quando utilizados de forma ativa (automatizados), exigem uma maior disponibilidade de tempo para a realização de medições em todas as suas configurações.

**® Controlar efetivamente a fonte de luz.**

Para que o sistema possa otimizar a iluminação natural no ambiente, é necessário que ele seja capaz de controlar a fonte de luz (a radiação solar), de forma a redirecioná-la e introduzi-la em pequenas quantidades, suficiente para a iluminação do ambiente em questão, a fim de evitar maiores problemas com ofuscamentos e ganhos térmicos excessivos.

No caso de ambientes iluminados por sistemas de aberturas laterais simples, o nível de iluminância decresce com o distanciamento da janela, acarretando em excesso de luz próximo à janela e deficiência luminosa nas áreas mais afastadas da abertura. Essa má distribuição da luz exige, muitas vezes, a implantação de sistemas de iluminação artificial, mesmo no período diurno, implicando acréscimos na carga térmica interna e no consumo de energia da edificação.

Assim, além de controlar, os sistemas devem ter a capacidade de melhorar a uniformidade da luz no ambiente, visto que uma grande quantidade de luz não é necessariamente eficiente se não for bem distribuída (LAM, 1986).

**® Controlar os ganhos térmicos**

A minimização dos ganhos térmicos pode ser atingida através do sombreamento da luz do sol. Assim, seria importante direcionar as aberturas para orientações que facilitem a utilização de dispositivos fixos para o sombreamento e redirecionamento da luz. Nas fachadas norte e sul, os dispositivos de sombreamento fixos podem ser utilizados durante todo o ano. Já nas orientações leste e oeste, os dispositivos fixos tornam-se ineficientes no início da manhã e no final da tarde, demandando um complemento com dispositivos de sombreamento móveis.

**3.2.2 SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL**

De acordo com a revisão bibliográfica, onde foram citados e comentados os principais sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol e com os aspectos citados anteriormente, foram selecionados os seguintes sistemas a serem analisados térmica e luminosamente:

**A) Abertura lateral com vidro simples**

É o sistema considerado mais simples, cujas características já são conhecidas e difundidas na literatura. Sua seleção deveu-se ao fato da necessidade de um sistema com características conhecidas para servir de parâmetro de comparação.

**B) Abertura lateral com prateleira de luz espelhada**

Trata-se de um elemento de controle do tipo telas rígidas. É um elemento associado a um componente de passagem lateral, posicionado horizontalmente acima da linha de visão, dividindo o componente em duas porções, superior (iluminação) e inferior (visão e ventilação). Intercepta a radiação direta do sol e redireciona a luz para o forro; dessa forma, reduz o ganho de calor e uniformiza a distribuição de luz natural nos interiores. Dimensões e características variam conforme o clima e a latitude. A grande vantagem desse sistema consiste na possibilidade da sua utilização em conjunto com aberturas laterais, por proporcionarem sombreamento, controle do ofuscamento e a não obstrução da passagem do vento.

**C) Abertura lateral com Painel Cortado a Laser (PCL)**

Pode ser caracterizado como um elemento de controle de superfície de separação do tipo ótico, pelo fato de redirecionar a luz direta de acordo com o ângulo de incidência. No entanto, a transparência entre os cortes é mantida a um nível bem razoável, permitindo a visão através do painel, o que não é o caso de painéis prismáticos onde a transparência visual é bastante reduzida.

Os cortes realizados a laser no painel de acrílico produzem superfícies internas altamente reflexivas, que redirecionam a luz direta do sol para o teto, de onde vai ganhar qualidade difusa antes de ser redirecionada para o ambiente interno.

Duas boas possibilidades de utilização desse sistema são a montagem dos painéis em janelas altas ou em forma de basculante, possibilitando um controle mais efetivo da luz solar e a não obstrução da passagem dos ventos.

**D) Abertura lateral com venezianas espelhadas fixas**

Trata-se de um elemento de controle do tipo filtro solar. O sistema é composto por lâminas paralelas externas fixas, que cobrem toda a superfície do componente de passagem. Esse sistema barra a luz direta do sol sobre os ocupantes, além de redirecioná-la para o teto do ambiente, de onde vai “ganhar qualidade difusa”. A sua principal vantagem é o melhoramento da uniformidade da luz no ambiente.

**E) Abertura zenital com vidro simples**

É o sistema de abertura zenital considerado mais simples. Sua seleção também deve-se ao fato de a necessidade de um sistema com características previamente conhecidas para servir de parâmetro de comparação entre os sistemas.

**F) Abertura zenital com sistema de seleção angular**

Trata-se de um componente de passagem zenital do tipo filtro solar. O sistema é composto por uma superfície inclinada e por um sistema de venezianas, que cobrem toda a superfície do componente de passagem. Esse sistema proporciona iluminação zenital (superior) sem permitir a entrada da radiação

solar direta, solucionando um dos grandes problemas das aberturas zenitais que é o aquecimento excessivo do ambiente, principalmente no período de meio dia e verão.

**TABELA 1** - Caracterização dos sistemas de iluminação natural selecionados.

Classificação	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com Painei cortado a laser	Abertura zenital com vidro simples	Sistema zenital com seleção angular
→ Componentes de condução						
Espaços iluminados intermediários	-	-	-	-	-	-
Espaços iluminados internos	-	-	-	-	-	-
→ Componentes de passagem						
Lateral	X	X	X	X	-	-
Zenital	-	-	-	-	X	X
→ Elementos de controle						
Superfícies de separação	X	-	-	X	X	-
Telas flexíveis	-	-	-	-	-	-
Telas rígidas	-	X	-	-	-	-
Filtros solares	-	-	X	-	-	X
Proteções solares	-	-	-	-	-	-

### 3.3 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO TÉRMICA E LUMINOSA

#### 3.3.1 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA NO AMBIENTE INTERNO

Para possibilitar a análise do desempenho dos sistemas de iluminação natural selecionados acima, é necessário quantificar os níveis de iluminância no ambiente interno.

Para possibilitar a análise do desempenho dos sistemas de iluminação natural, é necessário quantificar os níveis de iluminância no ambiente interno. Esta quantificação pode ser feita por meio de três métodos:

- medições em modelos em escala;
- uso de modelos matemáticos por meio de simulação computacional;
- técnicas gráficas.

A decisão de que método utilizar depende da natureza e do contexto em que está inserido o experimento. Para uma simples avaliação quantitativa, métodos numéricos ou gráficos simples podem ser mais apropriados. No entanto, para uma análise conjunta de uma série de aspectos e em um ambiente de projeto complexo, o modelo em escala (maquete) pode ser uma boa solução (ROBBINS, 1986).

A maquete é uma ferramenta de projeto, que os arquitetos têm usado amplamente para explorar e estudar diferentes questões do projeto, do edifício e da construção.

Além disso, o modelo em escala permite a realização de medição de iluminação sem requerimentos para compensação da escala, diferentemente da maioria dos outros modelos físicos, como o térmico, estrutural, acústico e ventilação, onde os aspectos da escala tendem a distorcer o fenômeno (ROBBINS 1986).

Assim, entre os métodos citados, o modelo em escala possui as seguintes vantagens por proporcionar (MOORE, 1991; ROBBINS, 1986):

- conveniente relação com edificação de geometria complexa.;
- resultados quantitativos precisos; exceto com modelos grosseiros;
- comparação fácil com componentes variáveis ou componentes característicos;
- significativa avaliação qualitativa, como condições de ofuscamento, contrastes no espaço através de eventuais observações ou fotografias;
- adequabilidade a estudos qualitativos através do uso de cores, materiais, layout de mobiliário, dentre outros;

Existe uma vasta literatura disponível a respeito de como fazer um modelo em escala reduzida. A maioria dos autores concorda que o primeiro aspecto a ser decidido deve ser a escala do modelo. Loveland & Brown (1987) sugerem algumas escalas de acordo com o tipo de análise que se deseja realizar (ver tabela 2):

**TABELA 02** - Resume as informações dadas por Loveland & Brown, (1987).

<b>Tipo de estudo</b>	<b>Proposta</b>	<b>Escala</b>
Modelo urbano	Verificar a influência da edificação no entorno	1/40 a 1/20
Janelas e formas de aberturas zenitais	Desenvolver o sistema de aberturas nas edificações para analisar a sua influência no ambiente interno diante das condições externas	1/10 a 1/6
Tratamento do envoltório	Modificação do projeto de iluminação natural diante do detalhamento do ambiente interno	1/5 a 1/3
Espaço interno	Modelo exato do ambiente interno com detalhes de cada característica que possa influenciar nos aspectos qualitativos e quantitativos da iluminação natural.	1/2 ou mais

Deve-se ter especial atenção ao tamanho da fotocélula, nivelamento e colocação do sensor, a fim de se diminuir a porcentagem de erro que estes podem causar nas medições.

Littlefair (1990) fornece uma lista a ser conferida, antes da realização das medições em maquetes. Assim, devem-se assegurar:

- a presença de todas as superfícies da sala;
- o acesso ao interior;
- a precisão das refletâncias das superfícies;
- a não existência de vazamentos de luz;
- o tamanho e as refletâncias corretas das obstruções externas;
- a precisão dos detalhes das janelas;
- a adequação da escala;
- a existência de um planejamento dos pontos a serem medidos.

As maquetes podem ser analisadas internamente sob condições simuladas (céu artificial) ou externamente sob condições de céu real (MOORE, 1991).

Os céus artificiais oferecem uma maior facilidade de controle e são estáveis, permitindo que se testem diferentes alternativas de projeto sob uma mesma condição.

Por outro lado, obter medições sob condições de céu reais é provavelmente o mais fácil e mais barato método. Além disso, pode simular o desempenho de qualquer modelo de luz natural. No entanto, a rapidez da variação das condições de céu pode introduzir erros nas medições de iluminância absoluta.

Outra limitação básica da medição em céu real é a falta de habilidade de reproduzir uma condição experimental. Moore (1991) situou que, em dois dias idênticos, as medições de luminância do céu irão tipicamente variar mais de 15%. Como consequência, todas as medições têm que ser feitas ao mesmo tempo. Isso significa que apenas um sensor para cobrir a malha de posições ou maquetes com componentes variáveis está fora de questão.

Apesar de o controle do sol, ou de qualquer outra fonte direcional, ser uma importante questão para a concepção do projeto, sempre que possível, devem ser feitos testes sob condições de céu reais. De acordo com Lam (1986), a avaliação sob céu real, além de ser mais realística, cria um reconhecimento claro do fenômeno estudado.

### **3.3.1.1 MODELOS REDUZIDOS PARA MEDIÇÃO DA LUZ NATURAL.**

Apesar da não existência de um procedimento normalizado para fotometria de modelos em escala, existe uma bibliografia generosa, nesse assunto, e uma boa quantidade de sugestão e recomendações podem ser encontradas em Hopkinson (1966), Robbins (1986), Lam (1986), Littlefair (1989) e Moore (1991).

#### **3.3.1.1.1 Descrição dos modelos em escala**

Foram construídas seis maquetes de um material denominado MDF, na escala de 1/10 (de acordo com a tabela 01). Uma vez que o experimento foi conduzido ao exterior, a característica básica esperada da maquete era que ela fosse feita com um material que apresentasse boa resistência às condições do ambiente externo.

As salas construídas tiveram como referência o modelo utilizado por Pereira (1992), em sua tese de doutorado, onde as dimensões do ambiente e as refletâncias foram definidas para exceder a profundidade das salas com iluminação natural, recomendadas pela Chartered Institution of Building Services Code for Interior Lighting (CIBS Code, 1984). O limite de profundidade foi calculado por:

$$D = \frac{2wh}{(h+w)(1-R_b)} \quad (2)$$

Onde:

$D$  = limite de profundidade;

$w$  = largura da sala;

$h$  = altura da janela contando desde o piso;

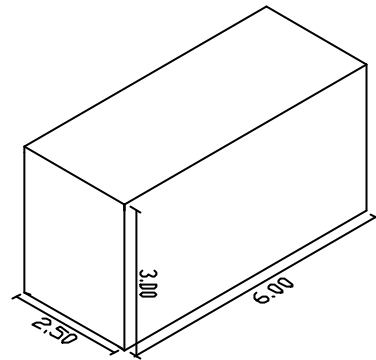
$R_b$  = cálculo médio das refletâncias ponderadas pela área das superfícies.

A dimensão final da sala foi de 600 X 250 X 300 mm (figura 54) e as refletâncias 25% para o piso, 55% para a parede e 75% para o teto.

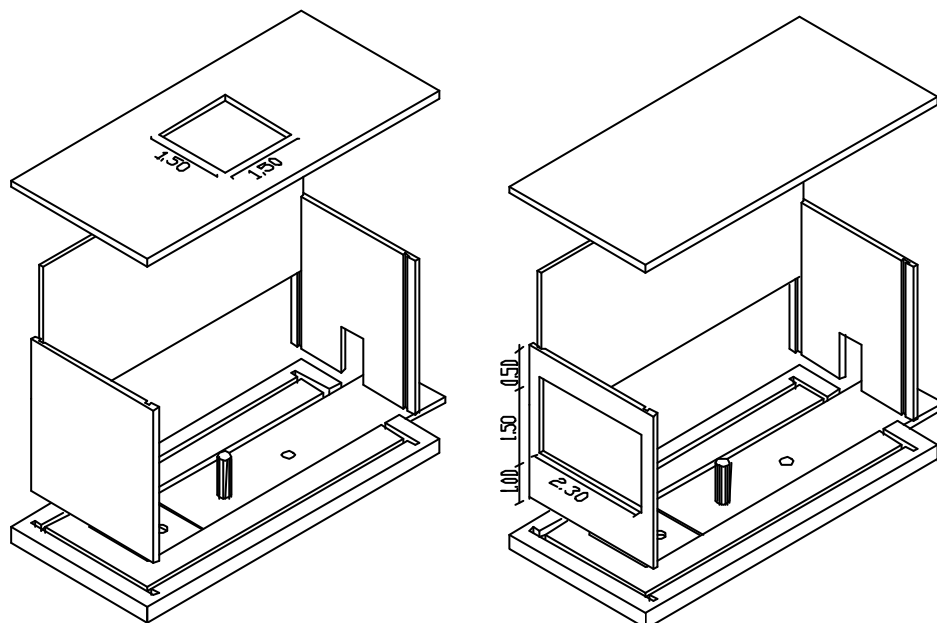
O limite de profundidade adequado pela equação foi de 550mm, ou seja, 50mm a menos do que a atual profundidade da sala utilizada. Tal alteração ocorreu

para testar a habilidade do sistema de abertura de redirecionar a luz do sol de forma profunda no espaço e proporcionar boa iluminação, mesmo que não atenda as recomendações.

Das seis maquetes construídas, quatro possuem aberturas laterais, ou seja, uma janela estendida de parede a parede com vidro simples de 3mm; as outras duas, uma abertura zenital centralizada de 1,5 x 1,5m, como mostra as figuras 55 e 56.

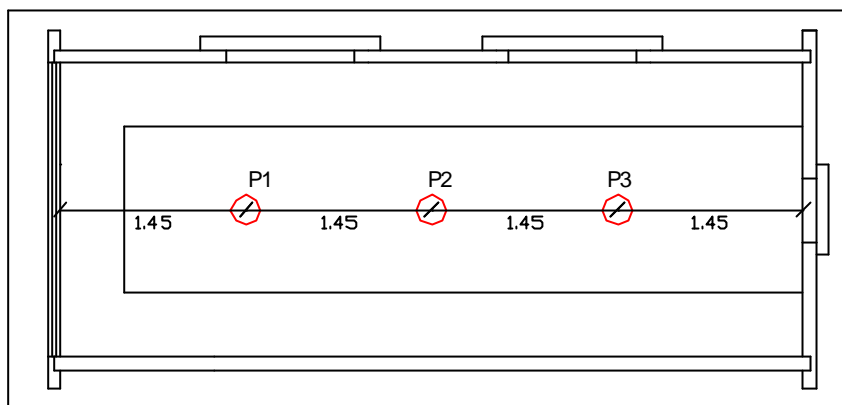


**FIGURA 54-** Dimensões da maquete.

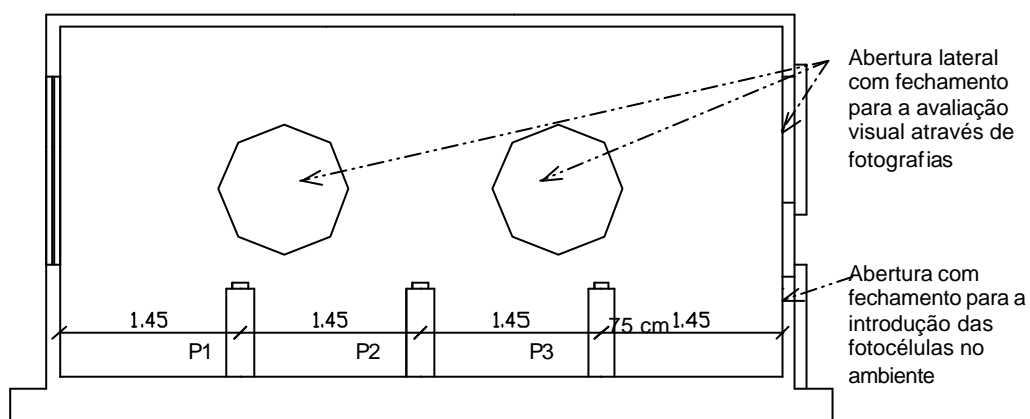


**FIGURAS 55 e 56-** Dimensões das aberturas zenital e lateral das maquetes.

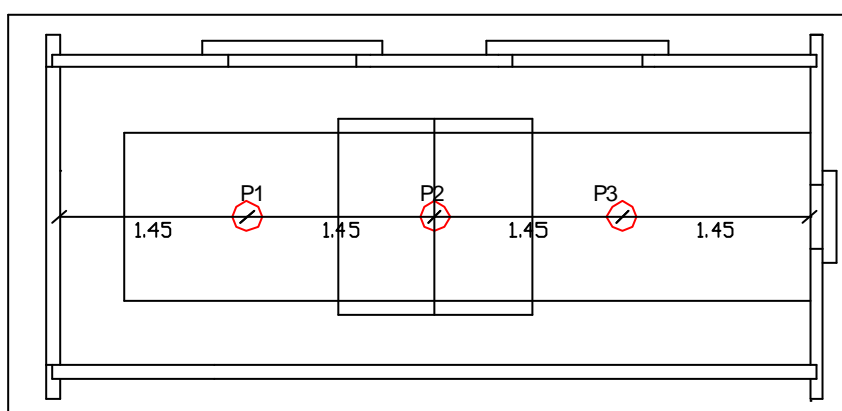
Foram selecionados três pontos internos, em uma linha centralizada com relação às distâncias da janela, para serem avaliados os níveis de iluminação sobre o plano de trabalho, 0,75 cm de altura (figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62).



**FIGURA 57** – Planta baixa, localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura lateral.

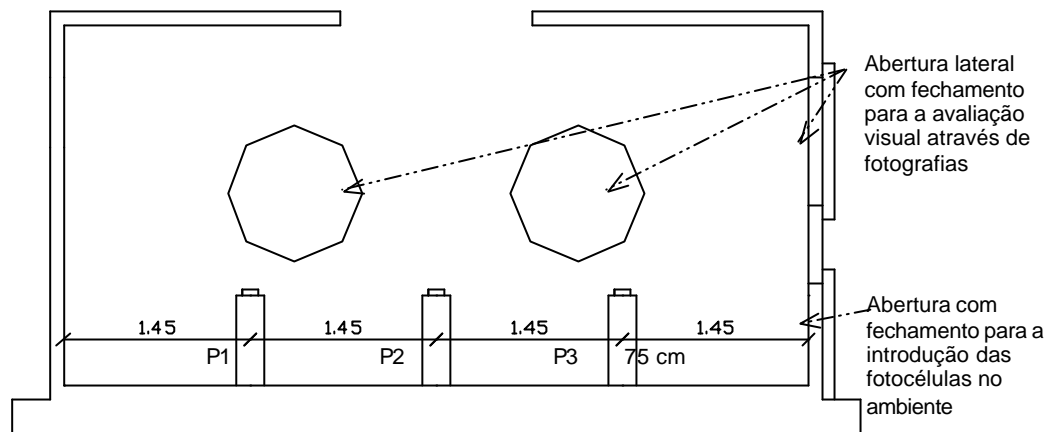


**FIGURA 58** – Corte esquemático, localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura lateral.



**FIGURA 59** – Planta baixa, localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura zenital.





**FIGURA 60**– Corte esquemático, localizando os pontos internos de medição – para as maquetes que possuem a abertura zenital.



**FIGURAS 61 e 62**– As fotos ilustram a localização dos pontos internos de medição.

A maquete foi pintada externamente de branco para prevenir o superaquecimento e possui pequenas aberturas para a avaliação da qualidade visual, por meio de fotografias. As refletâncias internas foram obtidas através da pintura das superfícies com diferentes tipos de cinza.

### Projeto dos sistemas de aberturas

Antes da realização de qualquer projeto de sistemas de iluminação natural, devem-se levar em consideração os seguintes itens:

- orientação da abertura;
- opções de projeto que proporcionem distribuição de luz de forma uniforme;
- controle ativo das aberturas com relação à luz natural e à transmissão do ganho solar.

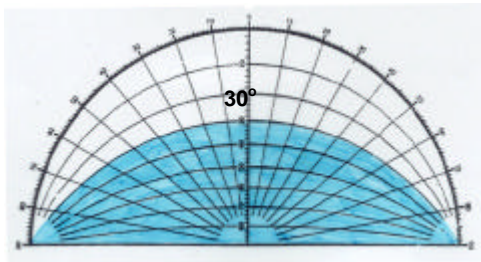
Neste trabalho optou-se por analisar janelas orientadas para o Norte, visto que essa é a orientação que mais favorece a utilização de dispositivos fixos para o sombreamento e redirecionamento da luz direta do sol, durante todo o ano.

➤ **Abertura lateral com prateleira de luz espelhada.**

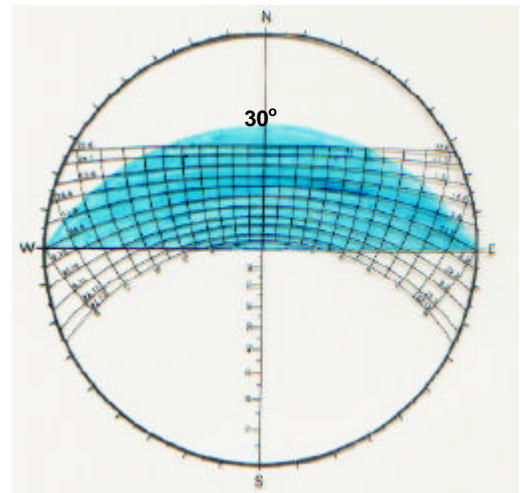
Inicialmente, para o projeto da prateleira de luz espelhada foi construída a máscara de sombreamento da abertura.

Esse método, o mais difundido até hoje, consiste na construção de máscaras de sombreamento para cada abertura da edificação, por meio do uso da carta solar junto ao transferidor de ângulos.

No transferidor de ângulo, sobreposto à carta solar, traçou-se o ângulo de ( $30^\circ$ ), necessário para o sombreamento da maior parte da incidência solar desejável.

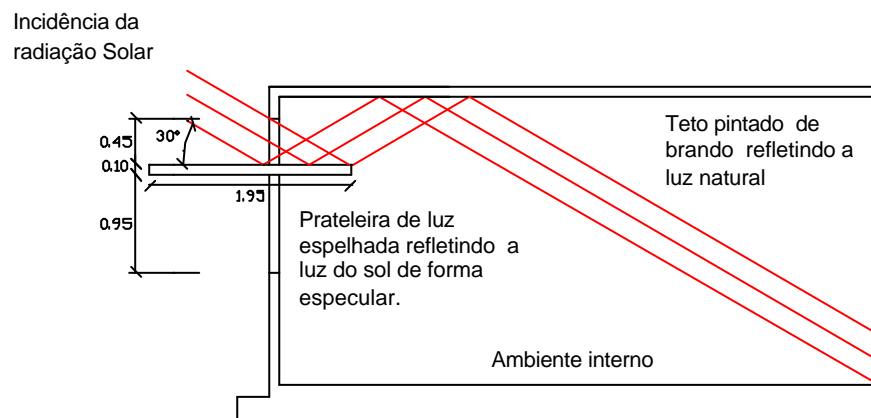


**FIGURA 63** – Transferidor de ângulos, indicando ângulo desejado para o sombreamento.

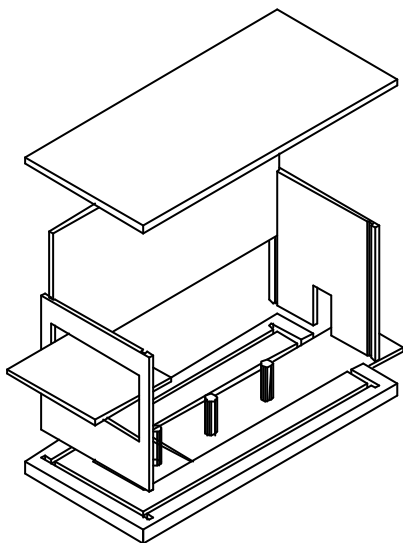


**FIGURA 64** – Carta Solar com a área pintada, indicando o período e a hora do ano em que a prateleira de luz sombreada o ambiente interno.

Este ângulo de  $30^\circ$ , que enforma a máscara de sombreamento, foi aplicado no corte do ambiente, que contém a abertura, para servir de base para a construção da prateleira de luz espelhada (figura 65).



**FIGURA 65** – Corte mostra a definição das dimensões da prateleira de luz espelhada a partir do ângulo de  $30^\circ$ , indicado no transferidor de ângulos e na carta solar.



**FIGURA 66** - Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com prateleira de luz espelhada.

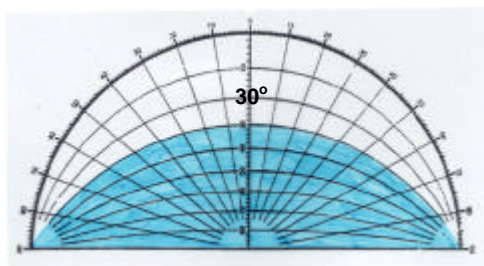


**FIGURA 67** - Foto da maquete com a prateleira de luz espelhada.

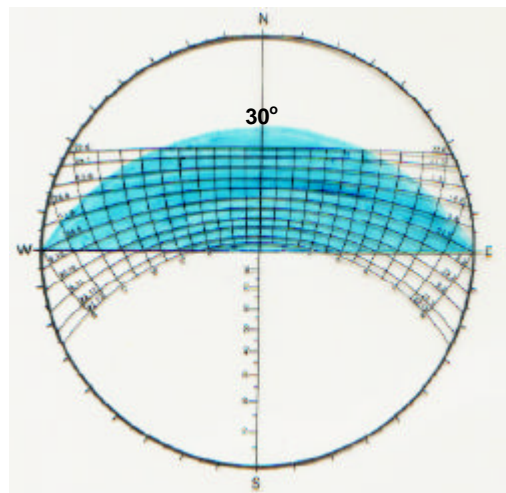
### ➤ Abertura lateral com veneziana espelhada fixa

Para o projeto da veneziana espelhada fixa, a ser localizado na abertura lateral de uma das maquetes, foi utilizado o mesmo método do projeto da prateleira de luz.

No transferidor de ângulos, sobreposto à carta solar, traçou-se o ângulo de  $30^\circ$ , necessário para o sombreamento da maior parte da incidência solar indesejável (figura 68 e 69).

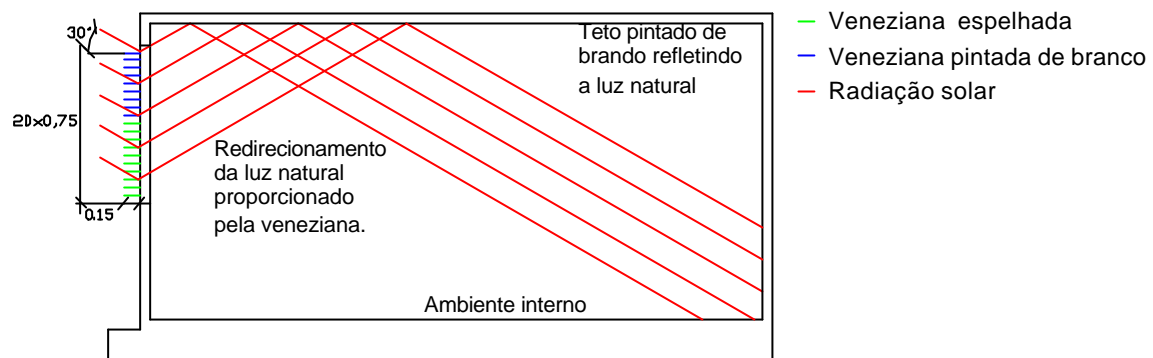


**FIGURA 68** – Transferidor de ângulos, indicando ângulo desejado para o sombreamento.



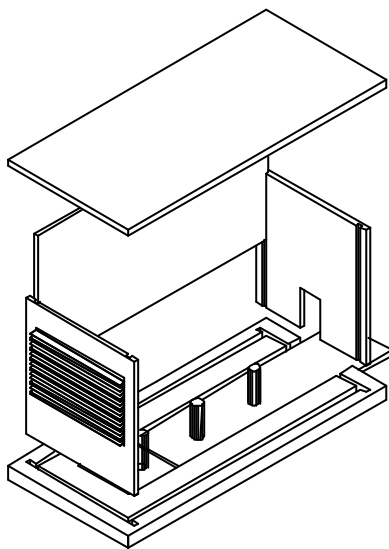
**FIGURA 69** – Carta Solar com a área pintada, indicando o período e a hora do ano em que veneziana sombreadará o ambiente interno.

Foi aplicado o ângulo de  $30^\circ$  no corte do ambiente para servir de base para a construção da veneziana espelhada (figura 70).



**FIGURA 70** – O corte mostra a definição das dimensões da veneziana a partir do ângulo ( $30^\circ$ ), indicado no transferidor de ângulos e na carta solar.

Através da figura 70, pode-se perceber que apenas a parte superior da abertura possui elementos com superfície espelhada. Uma vez que se pretende evitar desconforto visual por ofuscamento, optou-se por não colocar lâminas espelhadas no nível ou abaixo dos olhos dos usuários, visto que tais elementos poderiam redirecionar a luz na direção destes.



**FIGURA 71** - Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com veneziana.



**FIGURA 72** - Foto da maquete com a veneziana espelhada.

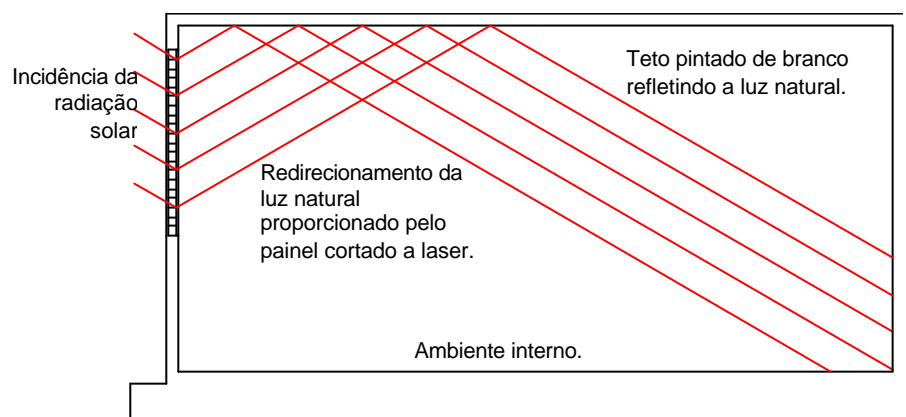
### ➤ Abertura lateral com painel cortado a Laser (PCL)

O painel cortado a laser foi desenvolvido no “*Center for Medical and Health Physics, School of Physics, Queensland University of Technology, Brisbane - Australia*”, por uma equipe de pesquisadores comandada por Ian R. Edmonds ([www.qut.edu.au](http://www.qut.edu.au), jul/2001).

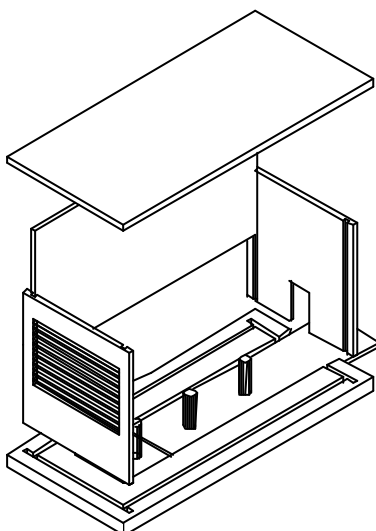
Assim, O PCL a ser inserido na abertura lateral de uma das maquetes foi cedido por Ian R. Edmonds, que nos enviou uma amostra de 20cm x 30cm. O painel acrílico, plano e transparente, possui 6 mm de espessura e os cortes, no sentido da largura do painel, foram realizados através de uma técnica com raio laser, com espaçamento de 0,75 cm (figura 73).



**FIGURA 73** – Foto do painel cortado a laser enviado por Ian R. Edmonds.



**FIGURA 74** - Corte indicando a localização do painel cortado a laser.



**FIGURA 75** - Perspectiva do projeto da maquete que conterá uma abertura lateral com o painel cortado a laser.



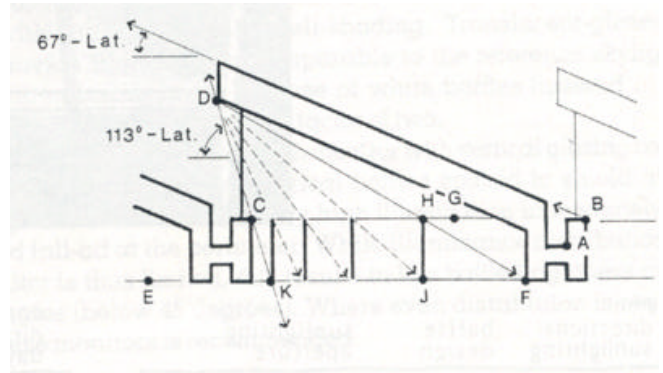
**FIGURA 76** - Foto da maquete com painel cortado a laser.



### ➤ Abertura zenital com seleção angular

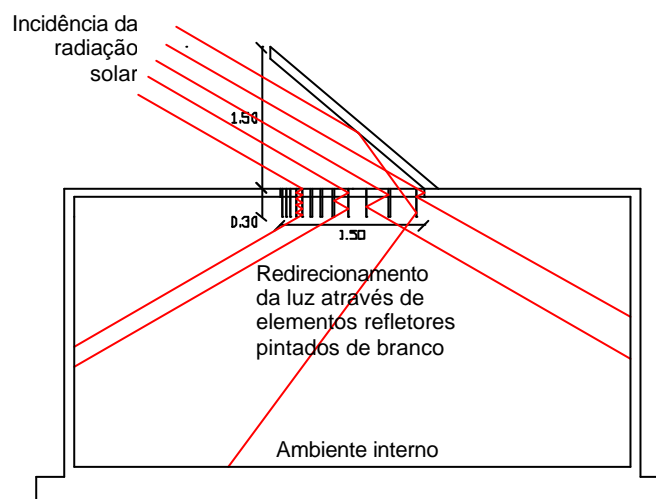
Para o projeto do sistema zenital com seleção angular, foi utilizado um método sugerido por Moore (1991), que indica alguns procedimentos de desenho (figura 77):

- Inicie no plano a (A), localize (B) para fazer a calha e a estrutura.
- Construa a linha da cobertura a  $67^\circ$  menos a latitude a partir de (B).
- Localize o nível (C) com (B), a partir da distância do espaço da janela.
- Construa a linha através de (C), cada uma com  $113^\circ$  menos a latitude.
- Localize (D), ao longo desta linha, para promover a largura adequada para a estrutura e isolamento.

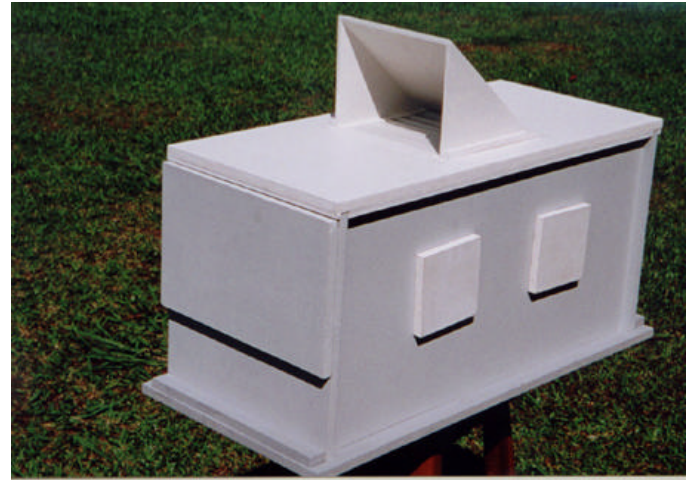
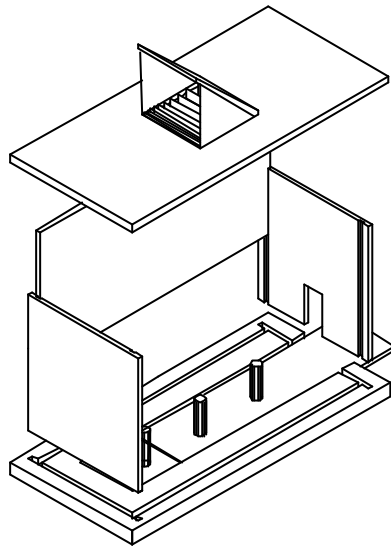


**FIGURA 77** – Ilustração que auxilia nos procedimentos de desenho. Fonte: Moore, 1991.

- Localize no plano de dispersão o ponto (E), na linha do teto.
- Localize (F), no plano (E), para determinar o espaço adequado da estrutura.
- Localize o ponto (G), no mesmo nível de (C).
- Construa uma linha para ser cortada (D) e (F).
- Localize no topo o ponto (H) e outro ponto diretamente para baixo (J).
- Construa a nova linha de corte (D) e (J), e repita os elementos de reflexão.
- Idealmente, a linha estendida de (D) a (C) tem que tocar a base do último plano de reflexão (K).



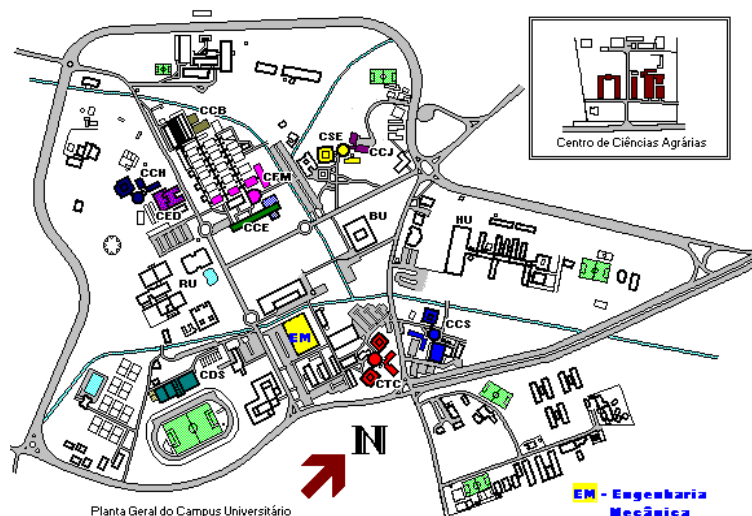
**FIGURA 78** – Corte indicando a definição das dimensões do sistema zenital com seleção angular, realizada a partir dos procedimentos de desenho indicados por Moore, 1991.



#### 3.3.1.1.2 Localização dos modelos e orientação das aberturas

A iluminação recebida em um ponto, situado em um determinado entorno, depende fundamentalmente da conjunção de dois parâmetros: do entorno observado a partir do ponto e das propriedades luminosas desse entorno (SOTERAS, 1985). Dessa forma, o posicionamento do modelo em uma área desobstruída é de grande importância, uma vez que se pretende avaliar basicamente o comportamento da radiação solar e da distribuição de luz na abóbada celeste, reduzindo ao máximo a influência da componente de reflexão externa.

Optou-se pela colocação do modelo em escala sobre a cobertura do prédio de Engenharia Mecânica do Campus Universitário de UFSC, em espaço cedido pelo Laboratório de Energia Solar dessa unidade (figura 81).



**FIGURA 81** – Localização do prédio de Engenharia Mecânica B no Campus da UFSC. Fonte: Souza, 1997.

Para verificar a presença de obstruções, fez-se um estudo fotográfico com a utilização de uma lente convexa, como pode ser visto na figura 83.



**FIGURA 82** – Foto da cobertura do prédio de Engenharia Mecânica da UFSC.



**FIGURA 83** – Foto com lente olho de peixe, ilustrando a obstrução do entorno do local onde serão realizadas as medições térmica e luminosas.

Para minimizar as reflexões vindas do solo (albedo), será utilizado um anteparo coberto por um papel camurça preto na parte inferior externa do modelo.

Como citado no início do capítulo, optou-se por analisar janelas orientadas para o Norte, visto que essa é a orientação que mais favorece a utilização de dispositivos fixos para o sombreamento e redirecionamento da luz direta do sol, durante todo o ano.

Obtida a visualização das obstruções do entorno, considerou-se que as obstruções vistas da fachada Norte da maquete são desprezíveis, com ângulos de obstrução inferiores a  $5^\circ$ .



**FIGURA 84** – Foto do entorno Norte.



**FIGURA 85** – Obstruções vistas da Maquete.

### 3.3.1.2 MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINAÇÃO

Para a medição dos níveis de iluminâncias externas e internas, foram utilizadas nove fotocélulas do tipo SA (LI-COR), uma fotocélula do modelo *PYRANOMETER* (LI-COR) e dois *Datalogger* do tipo *LI-250 LIGHT METER* da LI-COR.



### 3.3.1.2.1 Fotocélulas

O sensor utilizado para se tomar medições de iluminância é chamado de fotocélula ou fotossensor (elemento sensível à luz). Vale salientar que mesmo medições bem planejadas apresentam um provável erro de  $\pm 10\%$ . Esses erros podem ser classificados em dois grupos: no primeiro, aqueles que fornecem um igual desvio em todo o período (por exemplo, um erro de nivelamento do sensor); no segundo grupo, estão aqueles que afetam a fotocélula diferentemente em períodos diversos (por exemplo, o efeito da temperatura). O primeiro grupo é geralmente responsável pela maior parcela no erro total. Cuidados especiais também devem ser tomados quanto ao posicionamento e nivelamento da fotocélula – pequenas variações podem gerar grandes erros, especialmente em regiões onde o nível de iluminação varia bruscamente e/ou a luz chega obliquamente ao sensor (SOUZA, 1997).

Foram utilizados 2 fotocélulas do tipo SA (LI-COR) com conector BNC, 7 fotocélulas do tipo SA (LI-COR) sem conector BNC, para aquisição de dados iluminância interna e externa, e uma fotocélula modelo *PYRANOMETER* (LI-COR), para realização de medições externas.

Esses sensores vêm calibrados de fábrica e devem ser calibrados a cada dois anos. São caracterizados por possuírem correção do efeito cosseno e sensibilidade espectral muito perto da curva de sensibilidade do olho humano, definido pela CIE standard, não havendo a necessidade do uso de qualquer filtro.

O erro é tipicamente menor que  $\pm 5\%$  para ângulos de incidência, menores que  $80^\circ$  em relação ao eixo normal do sensor (LI-COR, 1991).



**FIGURA 86** – Foto de uma fotocélula com conector BNC



**FIGURA 87** – Foto de um Piranômetro conectado a um medidor de leitura instantânea da LI-COR.

### 3.3.1.2.2 Datalogger *LI-250 LIGHT METER* da *LI-COR*

Foram feitas medições de iluminâncias externas e internas, através de fotocélulas conectadas a dois *Datalogger* do tipo *LI-250 LIGHT METER* da *LI-COR*. O *LI-250* possui 10 canais para a entrada de sensores e funciona tanto como um aparelho de aquisição de dados quanto como um medidor multicanal. Possui dois canais de entrada de corrente, localizados em conectores BNC, seis canais analógicos adicionais (de entrada de corrente ou de voltagem) e dois canais de contagem de pulso.

Os dados podem ser armazenados manualmente para medição instantânea ou armazenadas automaticamente (modo LOG). A memória interna é de 32K bytes. O teclado é usado para a entrada dos multiplicadores de calibração do sensor, para definir a configuração dos canais, tempos de integração, limites de precisão, unidades e para armazenar leituras. A saída dos dados é lida por um software, com capacidade de armazenar e ou mostrar leituras instantâneas, integradas médias, leituras máximas ou mínimas. As funções matemáticas também permitem divisão, multiplicação, adição ou subtração de dois canais (LI-COR1990).

O modo de configuração do aparelho é usado para configurar cada canal para mostrar ou armazenar os dados de saída do sensor. Cada canal analógico possui 3 configurações, que incluem configuração para sensor de luz, termopares ou uma configuração geral para outros tipos de canal. Para este experimento, todos os canais foram configurados como sensores de luz - no modo LIGHT.

Os canais de 1 a 8 são canais analógicos que podem ser configurados tanto como canais de entrada de corrente quanto de voltagem. Na presente pesquisa, foram utilizados os canais para medida de corrente, foi feita a aquisição dos dados de forma manual e a saída dos dados foi lida de forma instantânea.



FIGURA 88 – Foto das fotocélulas e do piranômetro com o datalogger.

### 3.3.1.2.3 Fontes de Erro

As principais fontes de erro detectadas no presente experimento são citadas a seguir:

#### ➤ Calibração do sensor

A fonte de luz utilizada para a calibração do sensor deve ser adequadamente calibrada para que forneça uma saída conhecida e constante. No caso deste experimento, utilizou-se uma fonte de tensão estabilizada para evitar as variações de tensão na corrente fornecida pela companhia elétrica.

➤ **Saída do sensor**

Após longos períodos de exposição, as células tendem a se tornar menos sensíveis e recomenda-se que a calibração seja checada em períodos regulares. Quanto mais quente estiver o ambiente, menor será a precisão do sensor.

➤ **Resposta do efeito cosseno**

Medidas que precisem aproximar-se da radiação que atinge uma superfície plana, de todos os ângulos de uma hemisfera, são obtidas mais precisamente por meio de um sensor de cosseno corrigido. Um sensor com resposta do efeito cosseno permite que se façam medidas das densidades de fluxo por unidade de área ( $m^2$ ), através de uma superfície plana. Um sensor, sem uma correção de cosseno precisa, pode fornecer um grave erro sob condições de radiação difusa dentro de uma maquete, a baixos ângulos de elevação do sol, sob luz fluorescente, entre outros. Ambos os tipos de sensor utilizados neste experimento possuem resposta de efeito cosseno corrigido.

➤ **Tamanho das fotocélulas com relação às maquetes**

A saída de dados pode ser levemente diferente em um modelo do que no espaço em escala real.

➤ **Disposição e nivelamento do sensor**

A má colocação do sensor pode causar grandes erros e por isso o posicionamento de sensor deve ser cuidadoso.

➤ **Resposta espectral**

Os sensores modernos são calibrados para medir a faixa visível de radiação incidente.

### 3.3.2 METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR QUE ATRAVESSA OS SISTEMAS DE ABERTURA

Ultimamente, um número elevado de novas soluções para aproveitamento da luz natural, como elementos espelhados, bancadas de luz e vidros prismáticos tem sido proposto. Entretanto, pouco trabalho de pesquisa tem sido feito para o desenvolvimento de recomendações de projeto, a partir do fornecimento da admissão efetiva da luz natural e calor solar destas novas estratégias de aberturas.

No sistema de abertura, o ganho térmico pode ser proporcionado a partir de três componentes: a radiação solar transmitida de forma direta, o calor causado pela parcela da radiação solar absorvida pelos próprios elementos do sistema e o calor por convecção.

Pereira (1992) realizou uma revisão bibliográfica a respeito dos principais métodos utilizados para a determinação do ganho térmico nas aberturas: o primeiro deles, recomendado pela *Chartered Institution services engineers – CIBSE*, é baseado no Método de Admitância, desenvolvido pelo *Building Research Establishment – BRE* (MILLBANK & HARRINGTON, 1974). A característica principal desse método é a utilização de fatores de ganho solar (Fator Solar) para determinar a transmissão de calor solar em janelas e de valores derivados desses fatores para elementos de sombreamento.

O Fator de Ganho Solar (Fator Solar – FS), definido como a razão entre o ganho de calor solar da abertura e a radiação solar incidente sobre ela, é uma característica de cada sistema de abertura e depende do ângulo de incidência da radiação e da distribuição radiante da abóbada celeste.

O segundo método, proposto pela *American Society for Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering – ASHRAE*, estima a carga térmica de refrigeração, utilizando o Coeficiente de Sombreamento (SC) (ASHRAE Fundamentals, 1993; VILD, 1964).

O Coeficiente de Sombreamento (SC), por sua vez, é representado pela razão entre o fator de ganho de calor solar da abertura e o fator de ganho de calor solar de referência (vidro simples 3mm).

McCluney (1991) salienta a inadequabilidade dos coeficientes de sombreamento (SC) para cálculos horários de consumo de energia, especialmente no caso de sistemas de aberturas complexos, nos quais a distribuição espectral e o ângulo de incidência da radiação assumem um papel importante no ganho de calor solar. Para sistemas de aberturas simples, é considerada uma distribuição de radiação isotrópica da abóbada celeste. Pode-se utilizar um fator de correção simples, baseado na área exposta, para obter o SC final. Entretanto, para aberturas mais complexas e distribuições de radiação mais realistas, mesmo modelos matemáticos e computadores potentes podem apresentar uma precisão limitada devido a hipóteses teóricas usualmente assumidas nessas técnicas (PEREIRA, 1992).

Vale salientar que os dois métodos citados anteriormente assumem os elementos de sombreamento como superfícies planas atuando como refletores difusos, o que nem sempre é o caso, especialmente para técnicas inovadoras de iluminação natural (PEREIRA, 1992).

Por outro lado, técnicas utilizando aparatos experimentais com modelos em escala real ou reduzida, que realizam medições do ganho de calor solar de sistemas de aberturas, têm-se mostrado bastante eficientes na estimativa do comportamento térmico e luminoso das aberturas.

A literatura apresenta vários destes aparelhos (PARMELEE et al, 1948; BOREL, 1962; KIMURA, 1971; KLEMS et al, 1982), entretanto, a maioria deles, desenvolvidos e descritos nas referências acima mencionadas, apresenta alguns aspectos negativos comuns (PEREIRA, 1992):

- são de grandes dimensões e de alto custo;
- requerem uma manutenção cuidadosa das condições de equilíbrio;
- necessitam que diferentes medições sejam realizadas simultaneamente;
- possui operação complexa, exigindo pessoal especializado;
- possui avaliação limitada da dependência angular do ganho de calor solar.

Portanto, não é surpresa que muitos desses dispositivos já não estejam mais em uso. Um subcomitê estabelecido pela ASHRAE, em 1984, para desenvolver procedimentos padrões para as medições do ganho de calor solar através de aberturas, foi dissolvido em 1986, devido à falta de condições de estabelecimento de um senso comum (McCLUNEY, 1991).

Pereira (1992), em sua tese de doutorado, desenvolveu um aparato experimental para a medição da radiação solar transmitida através da abertura em modelo reduzido, tomando como base o aparato - “*Integrating Window Pyranometer- IWP*”, proposto por Bauman et al (1986).

Resumidamente, o IWP é formado por um sensor de fluxo de calor pintado de preto e posicionado atrás do modelo da abertura e resfriado por um ventilador para assegurar que toda radiação solar transmitida pela abertura seja conduzida através do sensor.

Embora o IWP apresente vários aspectos positivos, como medição da radiação total transmitida sobre a área da abertura (até mesmo fluxos de radiação não uniformes provenientes de aberturas complexas), independência espectral (por ser um aparato térmico), facilidade de manuseio e baixo custo, ele também possui algumas limitações a exemplo da baixa precisão para radiação incidente menor que  $250 \text{ W m}^{-2}$  (resultando num desempenho reduzido para situações sem sol direto, condições de céu com nuvens e ângulo de incidência elevados ( $<70^\circ$ )), tempo de resposta longo (aproximadamente 1 minuto) e variabilidade de sinal (PEREIRA, 1992).

Pereira (1992), no processo de desenvolvimento de um novo aparato experimental, para medição de ganho de calor em janelas, realizou algumas modificações no IWP, que tiveram como objetivo principal melhorar o tempo de resposta e precisão do aparelho na presença de baixos níveis de radiação solar.

Visto que o sensor tipo termopilha, utilizado no IWP, possuía uma inércia térmica elevada, optou – se por utilizar um transdutor de fluxo de calor baseado na integração de junções termoelétricas múltiplas sobre uma lâmina de constantan coberta, por eletrodeposição, com uma camada de cobre muito delgada. A técnica de circuito impresso, usada no processo de eletrodeposição, foi capaz de produzir em torno de 1.400 termopares numa área de  $0,01 \text{ m}^2$ .

Com esse novo sensor e um ventilador mais potente ( $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  de vazão de ar), para melhorar a taxa de remoção de calor pela parte de trás do sensor, Pereira (1992) obteve resultados bem melhores que os obtidos pelo IWP. O aparelho foi capaz de medir fluxos de calor menores que  $100 \text{ W m}^{-2}$ , com um tempo de resposta semelhante ao do solarímetro, utilizado no processo de calibração.

*“Sendo um sensor térmico, o sinal produzido é proporcional a uma diferença de temperatura e é sensível tanto a radiação de ondas curtas, como de ondas longas. Assim, o aparelho mede não apenas radiação solar transmitida diretamente, mas também o ganho indireto devido à absorção de calor nos componentes da abertura. A soma destas duas quantidades é o ganho total de calor da abertura, que é definido como ganho de calor solar. Diante destas considerações, o aparelho pode ser classificado como um radiômetro e foi, portanto, chamado de Radiômetro de Abertura (RA)”* (PEREIRA, 1993).

Neste trabalho, para possibilitar a análise do desempenho térmico dos sistemas de iluminação natural, selecionados no item 3.1, foi desenvolvido um Radiômetro de Abertura na UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) pelos laboratórios LabCon (Laboratório de Conforto Ambiental – Arquitetura) e LMPT



**FIGURA 89** - Radiômetro de abertura desenvolvido por Pereira em sua tese de doutorado. Fonte: Pereira, 1992.

(Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas - Engenharia Mecânica), tendo como base o Radiômetro de Abertura desenvolvido por Pereira (1992) na sua tese de Doutorado.

### 3.2.2.1. DESENVOLVIMENTO DO RADIÔMETRO DE ABERTURA

O Radiômetro de Abertura é um dispositivo que possibilita a análise do desempenho térmico de sistemas de iluminação natural. Trata-se de um método experimental para estimativa do ganho de calor solar através de sistemas de aberturas em modelos reduzidos. O aparelho está baseado num transdutor de fluxo de calor, fabricado pelo LMPT (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas - Engenharia Mecânica), cuja característica principal é sua habilidade de integrar a radiação incidente sobre sua área, tornando-o adequado para lidar com aberturas de geometria complexa.

Inicialmente, foi desenvolvido um primeiro protótipo composto por:

- uma abertura, para encaixe do sensor, feita de madeira compensada de espessura de 1,5 cm;
- um transdutor de fluxo de calor com dimensões de 30 x 30 cm;
- um ventilador para o controle da temperatura interna;
- quatro eixos roscáveis nas quatro extremidades da caixa - os eixos foram dimensionados para permitir o encaixe dos modelos de esquadrias na parte externa da caixa.

A figura 91 mostra um corte do Radiômetro, no sentido de cima para baixo, apresentando os seguintes componentes:

- proteção solar para o ventilador de insuflamento;
- ventilador de insuflamento;

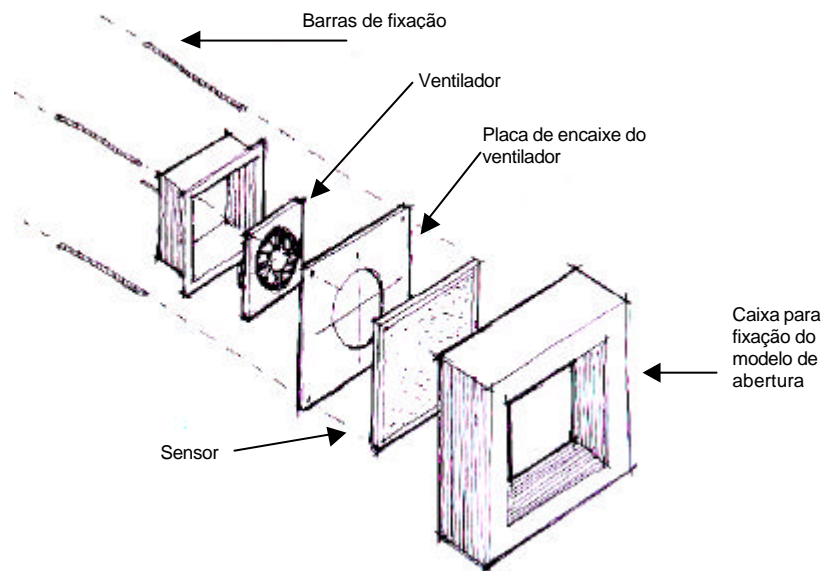


FIGURA 90 – Desenho esquemático do primeiro protótipo do Radiômetro de Abertura.

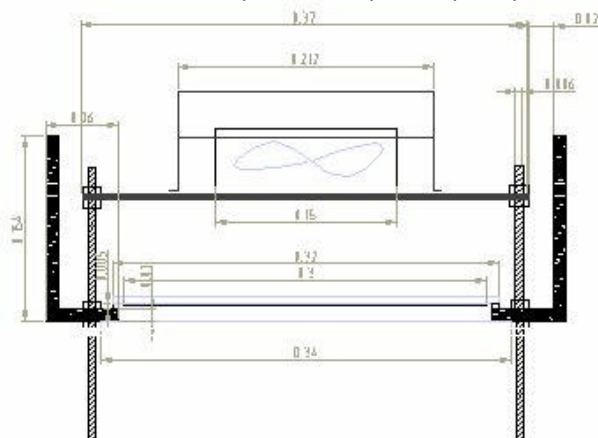


FIGURA 91 – Projeto do Radiômetro de Abertura.



- base de sustentação para o ventilador apoiada sobre quatro eixos roscados;
- transdutor no interior da caixa;
- câmara de ar;
- vidro que se deseja analisar.

Foram realizadas algumas medições com o protótipo para analisar o comportamento dos seus componentes.



**FIGURAS 92** - Montagem do primeiro protótipo do Radiômetro de Abertura na UFSC.



**FIGURAS 93** – Vista frontal da bancada em operação.



**FIGURAS 94** – Vista posterior da bancada em operação.

Entre outras medições, foi realizada uma no dia 6 de novembro de 1998, entre 11:00 e 12:00 horas da manhã, quando o Radiômetro estava posicionado normal ao sol.

Até o momento em que o ventilador estava desligado, a temperatura interna do Radiômetro chegou a atingir 56°C e o fluxo de calor medido era de aproximadamente 350 W/m<sup>2</sup>.

No momento em que o ventilador foi ligado, as temperaturas do transdutor e da câmara de ar interna se aproximaram rapidamente da temperatura do ar e, em menos de 10 minutos, se estabilizaram. O fluxo de calor também estabilizou-se rapidamente em  $333 \text{ W/m}^2$ , indicando uma baixa inércia térmica do transdutor utilizado. Para testar a resposta do radiômetro, a bancada foi protegida da radiação direta durante um minuto, gerando um decréscimo instantâneo da energia medida.

No entanto, nessa mesma medição, percebeu-se que o sensor de fluxo de calor só detectou a passagem de apenas um terço de toda a radiação solar incidente no vidro.

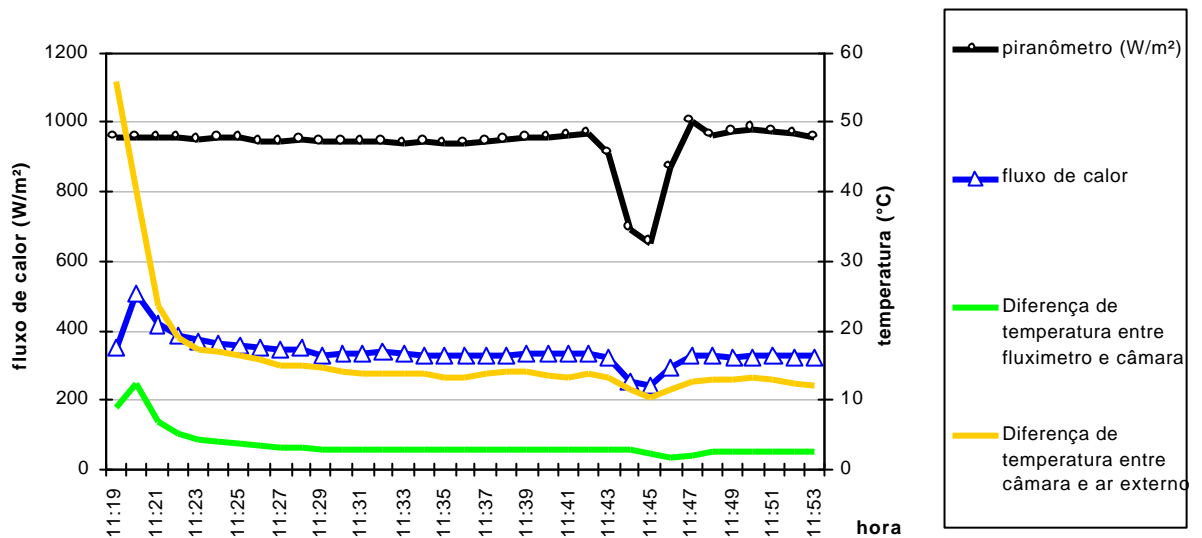


FIGURA 95 – Desempenho da bancada.

Sabe-se que, de acordo com a literatura, o Fator Solar do vidro utilizado na medição é de 0,87 e não de aproximadamente 0,35 como indicaram os resultados experimentais.

Para compreender melhor os resultados apresentados pelo experimento, foi realizada uma modelagem analítica, onde foi detectado que apenas  $13.7 \text{ W/m}^2$  de todo o fluxo de calor que penetrou pelo vidro foi reemitido para o exterior. Por ser um valor muito pequeno, inferior a 1.3% do valor que deveria passar pelo sensor, pode-se concluir que a energia que estava entrando pelo vidro estava sendo transmitida num fluxo preferencial para dentro do radiômetro, em quase toda sua totalidade. Ou seja, a placa de alumínio estava sendo resfriada de forma satisfatória pelo ventilador e que, provavelmente, o sensor de fluxo de calor não estaria funcionando de forma adequada.

Diante da incerteza das medições obtidas pela bancada, até o momento, foi proposta uma confrontação entre transdutores para avaliar o desempenho do sensor de  $30 \times 30 \text{ cm}$ , utilizado até o momento nas medições.

Dessa forma, foi colocado um segundo transdutor de  $5 \times 5 \text{ cm}$ , calibrado e de maior sensibilidade, junto ao transdutor maior, ambos fixados na mesma placa de alumínio. Foi detectado que a energia medida pelo fluxímetro maior oscilava entre 36% e 45% da energia pelo menor.

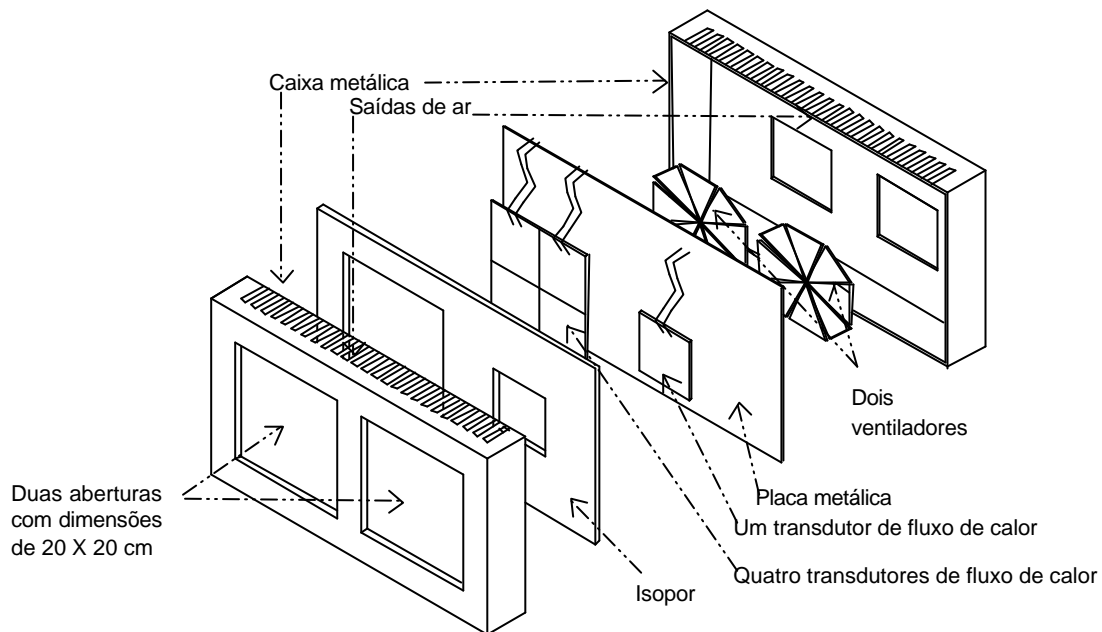


Uma vez descoberto o comportamento anômalo do transdutor, procedeu-se a uma investigação das causas de tal falha. A explicação mais razoável é a deformação da imagem usada para produzir as trilhas do circuito. Como, normalmente, trabalha-se com sensores menores, não foi considerado que a ampliação de uma imagem poderia gerar imprecisões que causassem fluxos inversos de fluxo de calor. Na prática, algumas áreas se comportavam de forma inversa, causando a redução do sinal.

Após esses ensaios, partiu-se para a elaboração do equipamento definitivo. Optou-se pela construção de um Radiômetro de Abertura, formado por uma caixa metálica, com saídas de ar localizadas no topo e na base, com duas aberturas com dimensões de 20 x 20 cm. Na primeira abertura, é colocado o sistema de iluminação natural a ser analisado e, na segunda, um vidro simples de 3 mm, como referência – uma vez que o seu fator solar, de 0,87, já é conhecido e amplamente difundido pela literatura.

Na parte posterior das aberturas, foram colocados, seqüencialmente:

- cinco transdutores de fluxo de calor fabricados pelo LMPT, com dimensões de 10 x 10 cm, pintados de preto, para assegurar que toda a radiação solar transmitida pela abertura seja absorvida e conduzida através do sensor. Optou-se pela utilização de transdutores menores do que os utilizados no protótipo, com o objetivo de evitar as distorções detectadas nas medições anteriores. Foram colocados 4 transdutores na janela 1 e apenas um transdutor na janela 2. Uma vez que o fluxo de calor que atravessa os sistemas de iluminação será expresso em  $W/m^2$ , não havia a necessidade da utilização de mais de um transdutor na janela 2, visto que esta abertura recebe um vidro simples, com uma condição homogênea em toda a sua extensão;
- Poliestireno expandido – proporciona o isolamento térmico do transdutor, garantindo que seja medido apenas o fluxo de calor transmitido pelo sistema de iluminação, ou seja, evita a influência do calor transmitido por outras superfícies do Radiômetro;
- uma placa metálica – além de suporte, uniformiza a condução do fluxo de calor;
- dois ventiladores – que irão resfriar a placa metálica, forçando a passagem de todo o fluxo térmico pelos transdutores;
- conjunto é agrupado através de oito eixos com roscas nas oito extremidades das aberturas.



**FIGURA 96** – Esquema indicando a composição do Radiômetro de Abertura.



**FIGURAS 97 e 98**- Configuração final do transdutor do Radiômetro de Abertura desenvolvido na UFSC.

### 3.3.2.1.1 Descrição dos Transdutores de fluxo de calor

Para determinação do fluxo de calor que atravessa os sistemas de iluminação, foram utilizados transdutores. A medição do fluxo de calor é baseada na lei de Fourier, relacionando a densidade de fluxo de calor ( $\dot{q}$ ) que atravessa um corpo (chamado parede auxiliar) com a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre as faces, conforme mostrado na figura 98.

$$\dot{q} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

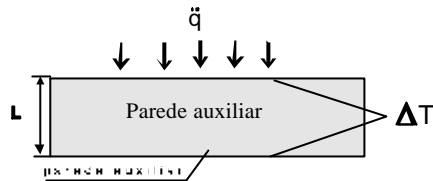


FIGURA 99 - Princípio de medição do fluxo de calor.

Onde:

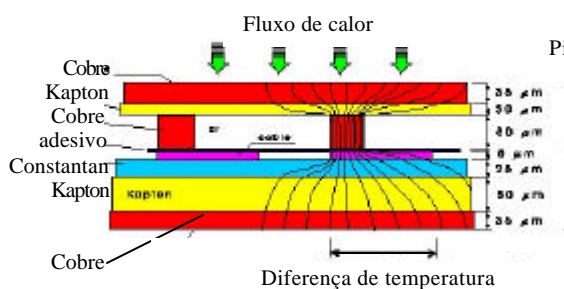
- $q$  é a densidade do fluxo de calor;
- $\Delta T$  é a diferença do fluxo de temperatura entre as faces da parede auxiliar;
- $k$  é a condutividade térmica;
- $L$  a espessura da parede auxiliar.

Podem-se distinguir dois tipos distintos de transdutores quanto à forma de medição da diferença de temperatura: transdutores a gradiente transversal e transdutores a gradiente tangencial.

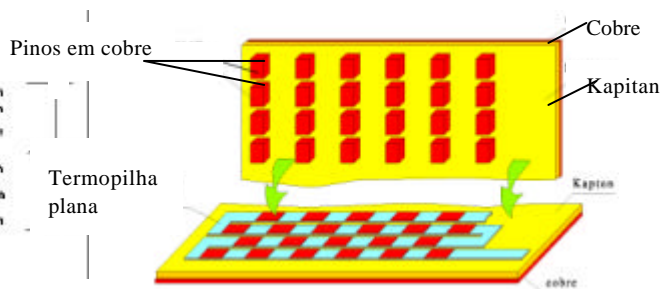
Nos Transdutores de Fluxo de Calor a Gradiente Transversal, a diferença de temperatura é medida num plano transversal ao plano de medição do fluxo de calor. As formas mais usuais de medição são apresentadas a seguir:

- 1- Transdutor a termopilha soldada
- 2- Transdutor a termopar depositado
- 3- Transdutor a furo metalizado

Na medições do presente trabalho, serão utilizados Transdutores de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial, cujo princípio de funcionamento consiste no desvio das linhas de fluxo de calor, de modo a gerar uma diferença de temperatura num plano tangencial ao plano de medição (GÜTHS, 1994). O desvio das linhas de fluxo é causado pelo contato pontual entre a superfície isotérmica superior e a parede auxiliar, segundo o esquema mostrado nas figuras 100 e 101.



FIGURAS 100- Corte transversal de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial



FIGURAS 101- Vista aberta do transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial

As diferenças de temperaturas serão medidas por termopares planares a eletrodos depositados ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em f.e.m Seebeck. A f.e.m (força eletro-motriz) produzida é diretamente proporcional ao número de termoelementos

distribuídos sobre a superfície útil do sensor. Essa técnica permite a realização de termopares desprovidos de soldas, facilitando a fabricação de transdutores com grande superfície de medida, alta sensibilidade e espessura reduzida.

Os transdutores serão conectados a um multímetro, o qual indicará a tensão gerada pelo sensor proporcional ao fluxo de calor, que os sistemas de aberturas transmitem. No entanto, antes da aquisição dos dados, deve ser feita a calibração dos transdutores, com o objetivo de conhecer a sua constante de propriedade (cada transdutor tem a sua constante específica).

Potência =  $\frac{\text{Tensão} \times \text{Constante}}{\text{Área}}$

(4)

Foram utilizados cinco transdutores de fluxo de calor, cuja verificação da sensibilidade é representada nos gráficos das figuras 102, 103, 104, 105, e 106, construídos a partir da área x sinal do fluxo. A área do fluxímetro foi dividida em 30 partes e o fluxo foi induzido por um resistor de área algumas vezes menor que a do fluxímetro e potência dissipada de 1 Watt.

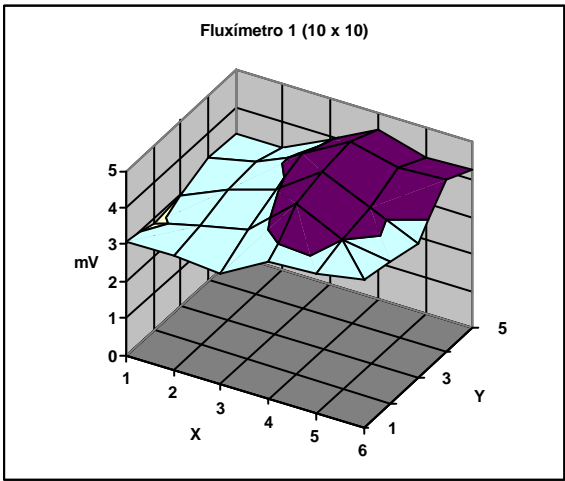


FIGURA 102- Área x sinal do fluxo do fluxímetro 1

TABELA 3 - Área x sinal do fluxo do fluxímetro 1

	1	2	3	4	5	6
1	3.1	3.1	3.0	3.7	3.8	4.0
2	2.9	3.2	3.5	4.6	4.0	3.8
3	3.0	3.5	3.9	4.8	4.2	3.6
4	3.3	3.6	4.2	4.9	4.6	4.7
5	3.3	3.3	3.9	4.6	4.2	4.3

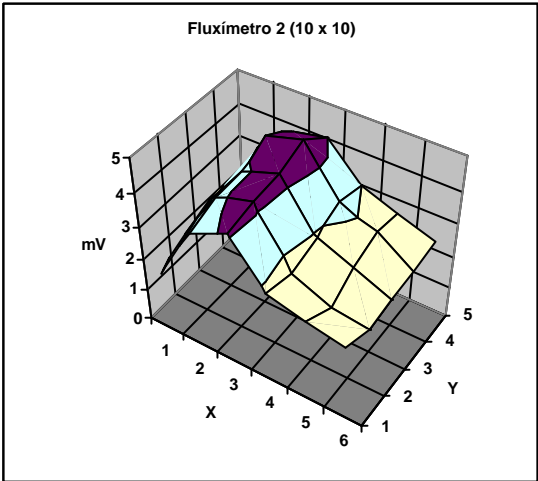


FIGURA 103- Área x sinal do fluxo do fluxímetro 2

TABELA 4 - Área x sinal do fluxo do fluxímetro 2

	1	2	3	4	5	6
1	1.8	3.6	4.1	2.8	2.5	2.3
2	2.3	3.9	4.2	2.6	2.1	2.0
3	2.6	3.9	4.3	2.9	2.5	2.0
4	2.2	4.3	4.6	3.2	2.8	2.1
5	2.0	3.8	4.0	3.0	2.6	2.2

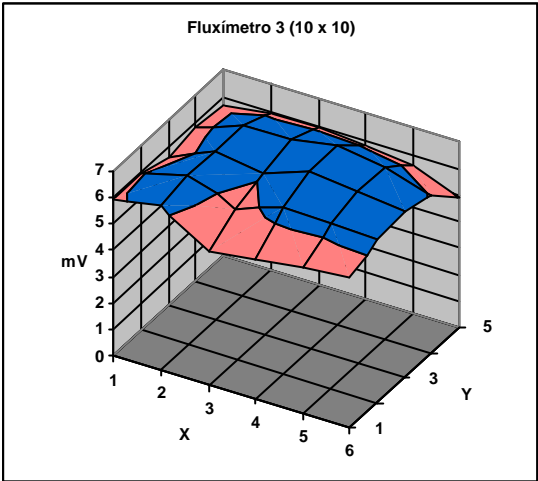


FIGURA 104- Área x sinal do fluxo do fluxímetro 3

TABELA 5 - Área x sinal do fluxo do fluxímetro 3

	1	2	3	4	5	6
1	5.9	6.3	5.0	5.3	5.5	5.7
2	6.0	6.4	5.7	6.3	6.2	6.2
3	5.6	6.4	6.1	6.7	6.5	6.3
4	5.8	6.4	6.4	6.7	6.5	6.0
5	5.7	5.9	5.9	5.8	5.6	4.9

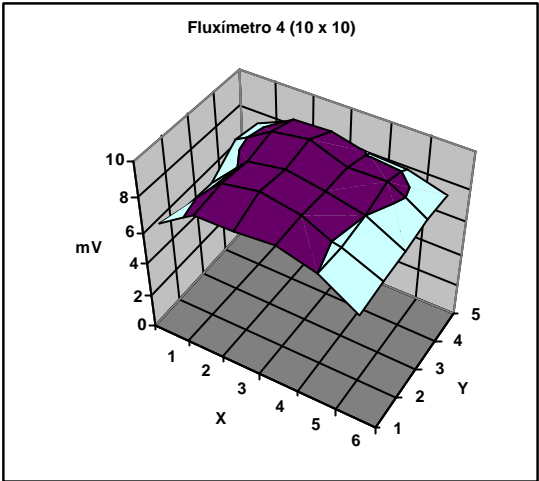


FIGURA 105- Área x sinal do fluxo do fluxímetro 4

TABELA 6 - Área x sinal do fluxo do fluxímetro 4

	1	2	3	4	5	6
1	6.9	8.4	8.4	8.6	8.0	6.7
2	6.5	8.7	9.1	8.7	7.8	6.9
3	6.4	8.5	8.9	8.5	8.0	6.9
4	7.6	8.8	9.2	8.4	8.5	7.3
5	7.3	8.2	8.4	7.9	7.8	7.1

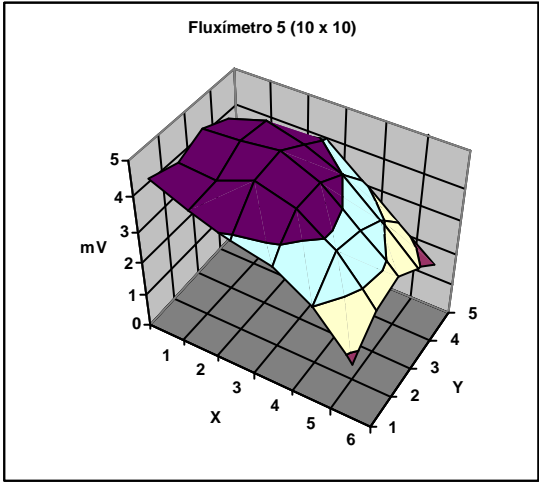


FIGURA 106- Área x sinal do fluxo do fluxímetro 5

TABELA 7 - Área x sinal do fluxo do fluxímetro 5

	1	2	3	4	5	6
1	4.7	4.3	3.9	3.7	3.0	1.8
2	4.5	4.4	4.8	4.5	3.8	2.5
3	4.7	4.8	4.9	4.5	3.6	2.7
4	4.4	4.7	4.4	4.0	3.1	2.1
5	3.3	3.6	3.9	3.1	2.3	1.4

Podem-se ver, através das figuras 103 e 106, que os fluxímetros 2 e 5 possuem uma maior variação de sensibilidade sobre a sua área, o que pode configurar uma fonte de incerteza. Caso a incidência de fluxo de calor seja uniforme, o erro pode ser estimado em 20%; caso o fluxo de calor incidente não seja uniforme, o erro cai para 5%, mais os 3% do erro de calibração.

Como os transdutores 1, 2, 3, e 4 irão trabalhar de forma conjunta na janela 1 do Radiômetro, geralmente, com incidência não uniforme da radiação solar, o erro estimado foi de 9%, mais os 3% do erro de calibração.

O transdutor 5 será implantado na janela 2 do Radiômetro e medirá apenas o fluxo de calor proveniente do vidro simples, que não muda as características direcionais da Radiação. Como este sensor irá trabalhar apenas com a incidência uniforme da radiação solar, estima-se seu em 5%, mais os 3% do erro de calibração.

Antes da aquisição dos dados, deve ser feita a calibração dos transdutores, com o objetivo de conhecer as suas constantes (cada transdutor possui a sua constante específica), as quais serão utilizadas para a determinação da potência do fluxo de calor.

$$\text{Potência} = \frac{\text{Tensão} \times \text{Constante}}{\text{Área}} \quad (5)$$

Foram utilizados dois métodos para calibrar os cinco transdutores de fluxo de calor de forma independente, a fim de se obter uma constante para cada um deles.

#### ➤ Método do Transdutor Auxiliar

Nesse método, o fluxo de calor perdido pelo isolante é medido por um transdutor previamente calibrado, sendo subtraído do valor dissipado pela resistência aquecedora.

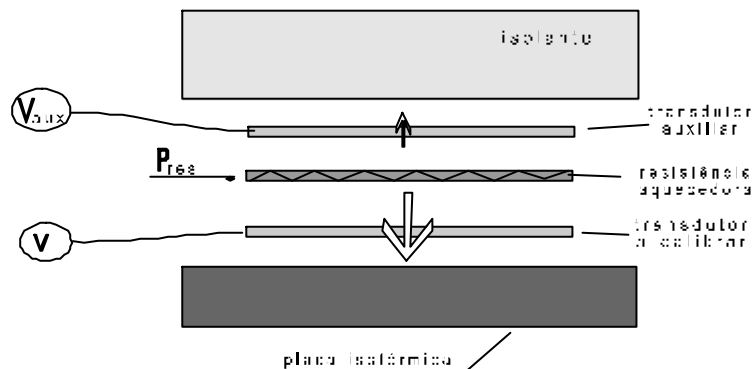


FIGURA 107 - Sistema de calibração, utilizando o Método do Transdutor Auxiliar

A tabela 8 apresenta os resultados do processo de calibração para os cinco sensores usados.

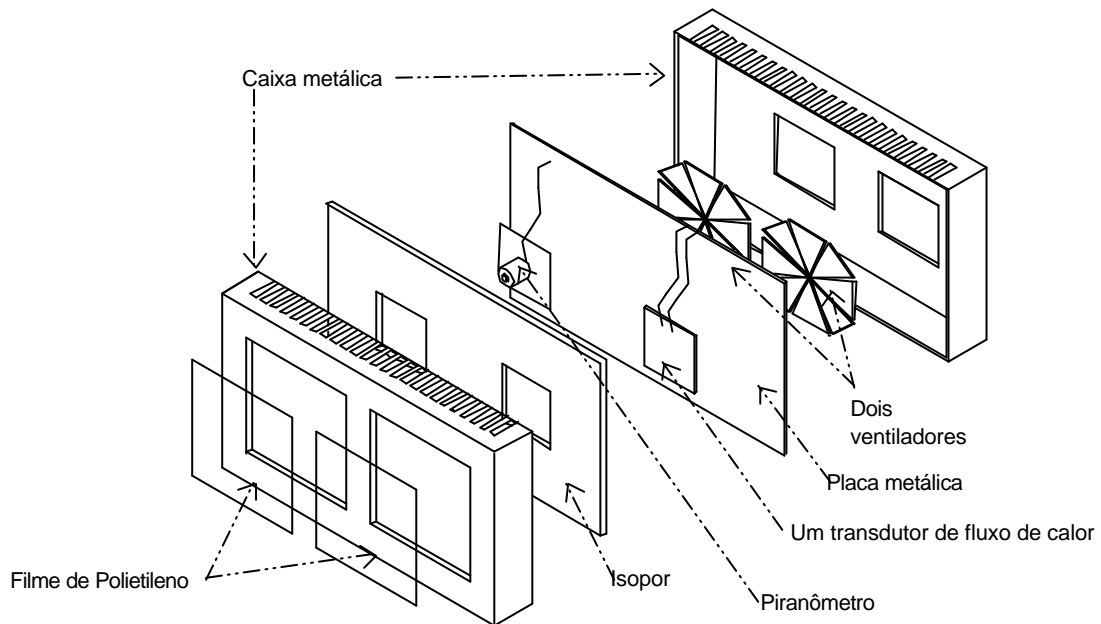
TABELA 8 - Constantes dos cinco transdutores de fluxo de calor.

Constante dos sensores de fluxo de calor				
Constante S1 (W/mV)	Constante S2 (W/mV)	Constante S3 (W/mV)	Constante S4 (W/mV)	Constante S5 (W/mV)
0.369	0.311	0.191	0.301	0.188

➤ **Método de calibração lado-a-lado.**

Esse método, similar ao utilizado por Bauman et al (1986), é feito através de comparações lado-a-lado do transdutor com um piranômetro e é particularmente interessante para calibração "in Loco".

A montagem do Radiômetro de Abertura para a calibração foi feita de acordo com a figura 122.



**FIGURA 108** – Montagem do Radiômetro de abertura para a calibração dos transdutores de fluxo de calor.

Nas medições para calibração dos cinco transdutores de fluxo de calor foram encontradas as constantes indicadas na tabela 9.

**TABELA 9** - Constantes dos cinco transdutores de fluxo de calor

Constante dos sensores de fluxo de calor				
Constante S1 (W/mV)	Constante S2 (W/mV)	Constante S3 (W/mV)	Constante S4 (W/mV)	Constante S5 (W/mV)
0.489	0.387	0.249	0.374	0.2175

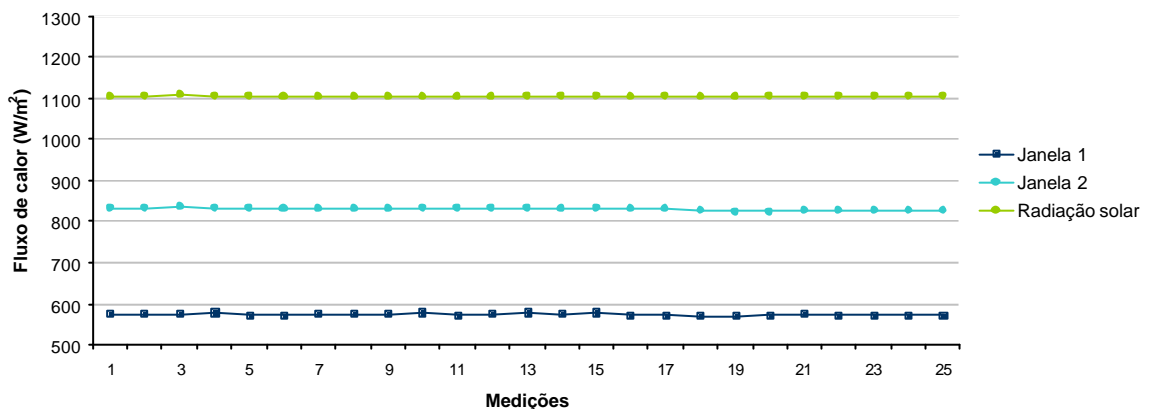
Ao compararmos as constantes encontradas nas tabelas 8 e 9, pode-se perceber que existem diferenças entre que variam entre 13 a 24%. Assim foi realizado um estudo piloto com o Radiômetro de Abertura a fim de verificar qual dos dois métodos de calibração seria o mais adequado, para este tipo de experimento.

O Radiômetro de Abertura foi exposto a reais condições de céu claro e a incidência normal da radiação solar. Em suas janelas, foram colocados, externamente, vidros simples 3 mm e, internamente, Transdutores de Fluxo de Calor, ligados a um multímetro.

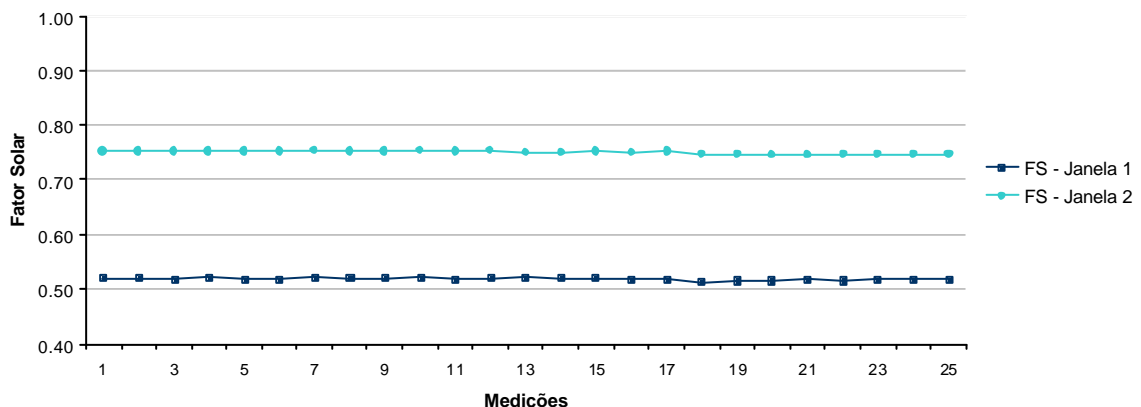
Foram realizadas medições do fluxo de calor que atravessa os vidros colocados na superfície externa do Radiômetro de Abertura, durante vários dias, para verificar a precisão obtida por esse aparelho.

No gráfico da figura 109, foram plotados valores que representam os ganhos térmicos registrados pelos transdutores de fluxo de calor do Radiômetro e pelo Piranômetro. No tratamento de dados, foram utilizadas as constantes de calibração obtidas através do **método do transdutor auxiliar**. Visualmente pode ser percebido que as janelas expostas às mesmas condições físicas e ambientais apresentam fluxos térmicos distintos.

No gráfico da figura 110, foram traçados os valores de Fator Solar dos vidros simples. O gráfico continua indicando problemas, visto que as duas janelas continuam apresentando valores de fatores solares distintos e diferentes da literatura, que indica 0,87 para o vidro simples. A má correlação entre fluxos térmicos, medidos nas duas janelas, pode indicar uma imprecisão das constantes de calibração obtidas através do primeiro método.



**FIGURA 109** – Medições dos ganhos térmicos registrados pelos dois transdutores de fluxo de calor e pelo Piranômetro, sob condições de céu claro

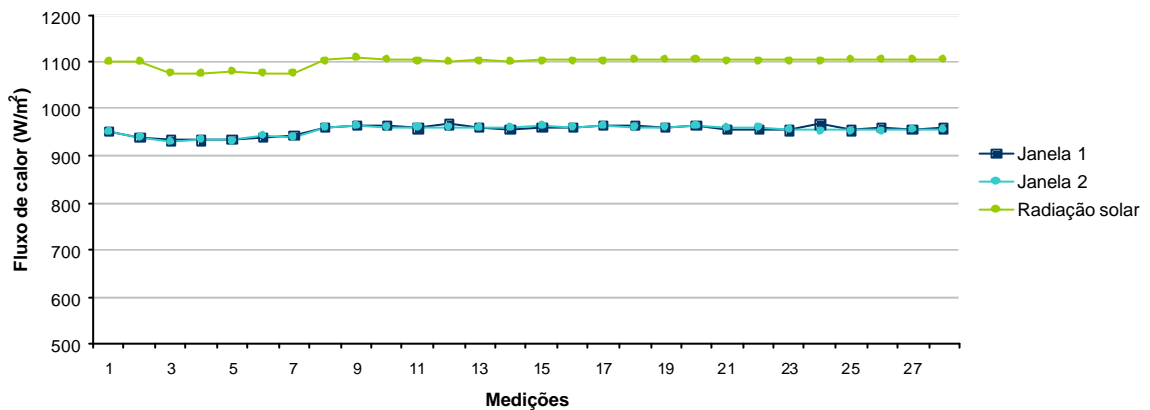


**FIGURA 110** - Fator Solar do vidro simples com céu claro, sob incidência normal de radiação solar.

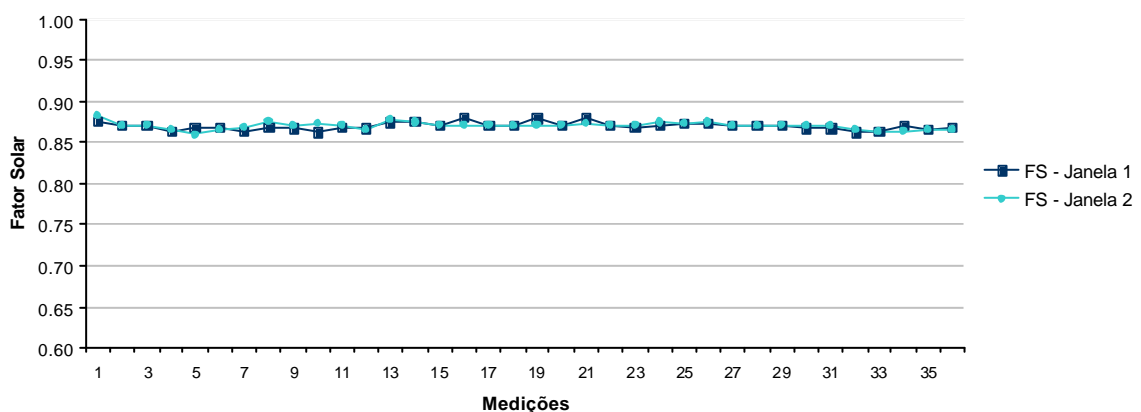


No gráfico da figura 111, foram novamente traçados valores que representam os ganhos térmicos registrados pelas duas janelas do Radiômetro e pelo piranômetro. No entanto, no tratamento de dados, foram utilizadas as constantes de calibração obtidas através do **método de calibração lado-a-lado**. Visualmente, pode ser percebida a boa correlação entre os valores medidos pelos transdutores e pelo piranômetro. Os resultados indicam uma boa sensibilidade do equipamento para esse tipo de medição e nos leva a crer que o segundo método seria o mais indicado para a calibração dos transdutores, neste experimento.

No gráfico da figura 112, foram traçados os valores de Fator Solar dos vidros simples expostos sob condição de céu claro e sob incidência normal da radiação solar. O gráfico indica um bom funcionamento do equipamento e a precisão das constantes de calibração encontradas pelo segundo método, visto que as duas janelas, colocadas sob as mesmas condições físicas e ambientais, apresentaram valores idênticos e bem próximos da literatura, que é de aproximadamente 0,87.



**FIGURA 111**– Medições dos ganhos térmicos registrados pelos dois transdutores de fluxo de calor e pelo Piranômetro, sob condições de céu claro



**FIGURA 112** - Fator Solar do vidro simples com céu claro, sob incidência normal de radiação solar.

As principais características e vantagens desse dispositivo são:

- possui boa precisão e estabilidade;

- possui instrumentação simples, barata e fácil de operar;
- realiza medições do fluxo de calor diante dos mais variados e complexos tipos de aberturas e sistemas de iluminação natural, incluindo o fluxo transmitido pela esquadria;
- mede não só a radiação solar transmitida diretamente, mas também o calor absorvido pelas folhas de vidro que são retransmitidos;
- possui fácil operação e particularmente de baixo custo de fabricação, quando comparado com alguns equipamentos semelhantes (o calorímetro proposto pela ASHRAE pode ser um exemplo).

Os resultados podem servir como recomendações para projeto e/ou como dados de entrada para calibração de programas de simulação de consumo de energia em edificações (VisualDOE, DOE2-1E, Esp-R, etc.).

### 3.4 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

A proposta de análise do desempenho térmico e luminoso dos sistemas de iluminação natural que utilizam a luz solar direta consistiu numa investigação experimental sob condições ambientais reais, onde foram realizadas medições dos níveis de iluminância, através de fotocélulas nos modelos em escala reduzida e medições do fluxo de calor, que atravessa os mesmos sistemas inseridos na maquete, através do uso do Radiômetro de Abertura.

Para possibilitar a avaliação da variabilidade da luz e da radiação solar no decorrer do dia, foram feitas quatro medições durante os seguintes horários:

- 9 às 10 h;
- 11 às 12 h;
- 13 às 14 h;
- 15 às 16h.

Devido à disponibilidade de fotocélulas (nove) e de janelímetros (um com duas aberturas), não foi possível a realização de medições simultâneas entre todos os sistemas de iluminação natural. Assim, foi utilizada, em todas as medições, uma abertura lateral ou zenital composta com vidro simples 3m, para que possa servir como parâmetro de comparação entre os sistemas analisados:

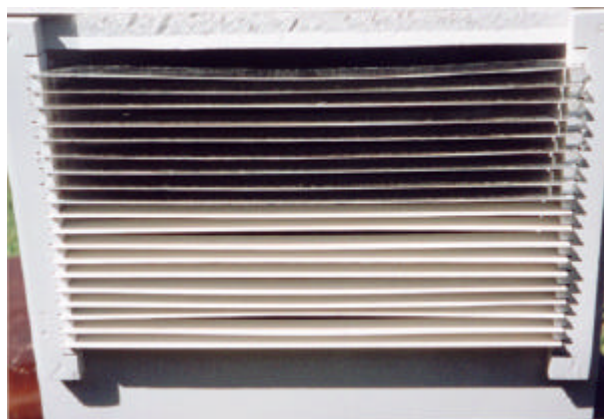
- Abertura lateral com vidro simples (3 mm);
- Abertura lateral com prateleira de luz espelhada e vidro simples (3 mm);
- Abertura lateral com veneziana fixa e vidro simples (3 mm);
- Abertura lateral com painel cortado a laser;
- Abertura zenital com vidro simples (3 mm).
- Abertura zenital com sistema de seleção angular e vidro simples (3 mm).

Para a determinação dos níveis de iluminância horizontal, foram utilizadas seis maquetes com ambientes idênticos, nas quais variam apenas o tipo de abertura e de sistema de iluminação natural.

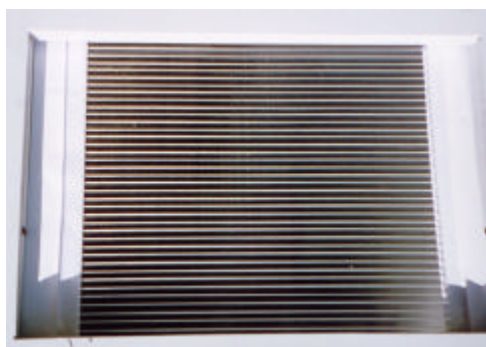
Nessas maquetes foram realizadas medições nos pontos indicados no item 3.3.1.1.1, com o objetivo de verificar a variação da entrada de luz em profundidade nos ambientes, em função dos sistemas de iluminação natural.



**FIGURA 113-** Foto da prateleira de luz



**FIGURA 114-** Foto da veneziana espelhada



**FIGURA 115-** Foto do painel cortado a laser

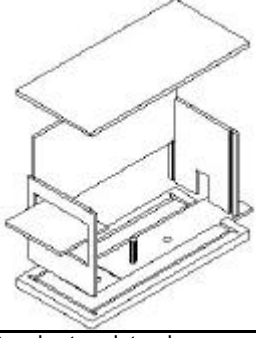
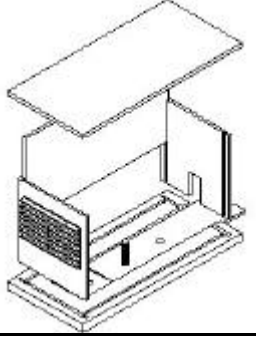
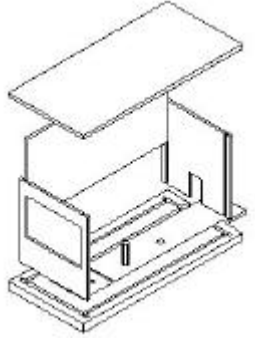
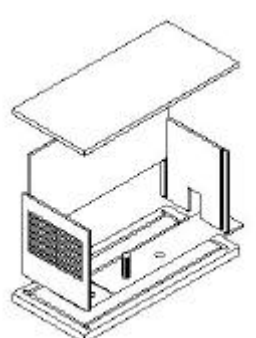
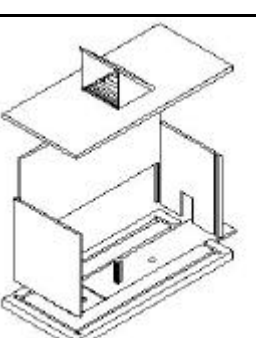
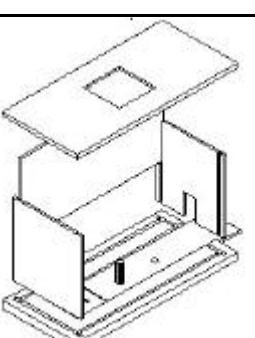


**FIGURA 116-** Foto do sistema zenital com seleção angular

À medida que acontece a aquisição dos dados de iluminância interna, uma fotocélula mede a iluminância horizontal externa, para servir como mais um parâmetro de comparação entre os sistemas a serem analisados.

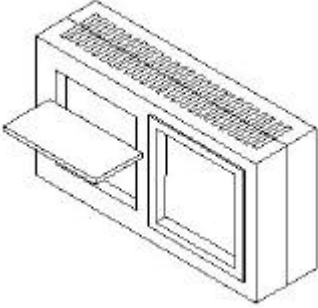
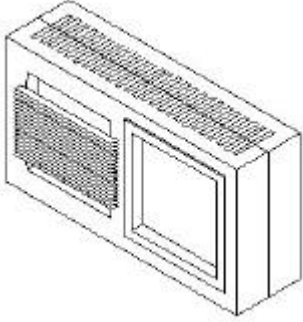
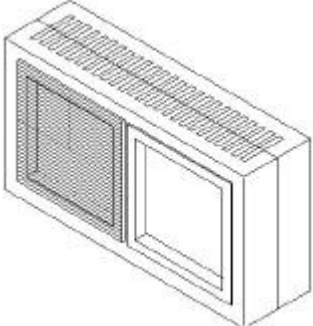
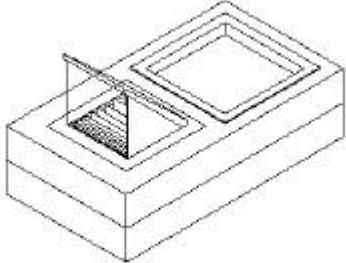
Assim, todas as medições luminosas (medição 1, 2, 3 e 4) foram realizadas em um mesmo dia, e coletados, em cada horário de medição (9 às 10 h, 11 às 12 h, 13 às 14 h e 15 às 16 h), 10 valores de iluminância interna – sendo 10 valores para cada um dos três pontos de medição interna - e 10 valores de iluminância horizontal externa. Durante cada medição, foram coletados valores a cada cinco segundos.

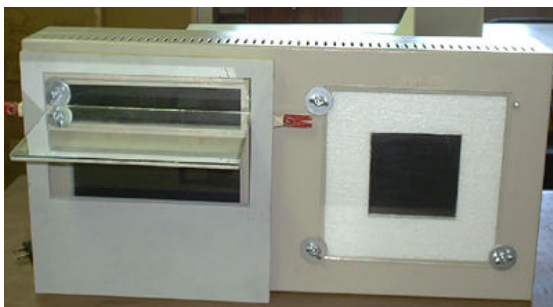
**TABELA 10** - Configuração dos sistemas de iluminação natural nas maquetes para as medições de iluminância.

MEDIÇÕES	MODELOS EM ESCALA REDUZIDA	
<b>MEDIÇÃO LUMINOSA 1</b>  Foram realizadas medições simultâneas entre as maquetes 1 e 2, sob condições de céu claro.	 <p>Maquete 2 - abertura lateral com prateleira de luz espelhada e vidro simples 3 mm.</p>	
<b>MEDIÇÃO LUMINOSA 2</b>  Foram realizadas medições simultâneas entre as maquetes 1 e 3, sob condições de céu claro.	 <p>Maquete 3 - abertura lateral com venezianas fixas vidro simples 3 mm.</p>	
<b>MEDIÇÃO LUMINOSA 3</b>  Foram realizadas medições simultâneas entre as maquetes 1 e 4, sob condições de céu claro.	 <p>Maquete 4 - abertura lateral com painel cortado a laser.</p>	<p>Maquete 1- abertura lateral com vidro simples 3 mm.</p>
<b>MEDIÇÃO LUMINOSA 4</b>  Foram realizadas medições simultâneas entre as maquetes 5 e 6, sob condições de céu claro.	 <p>Maquete 6 - abertura zenital com sistema de seleção angular e vidro simples 3 mm.</p>	 <p>Maquete 5 - abertura zenital com vidro simples 3mm</p>

Em seguida, foram realizadas medições do fluxo de calor transmitido através das aberturas do Radiômetro. A tabela 11 mostra a configuração das aberturas do radiômetro em cada medição.

**TABELA 11** – Configuração das aberturas do Radiômetro para as medições térmicas.

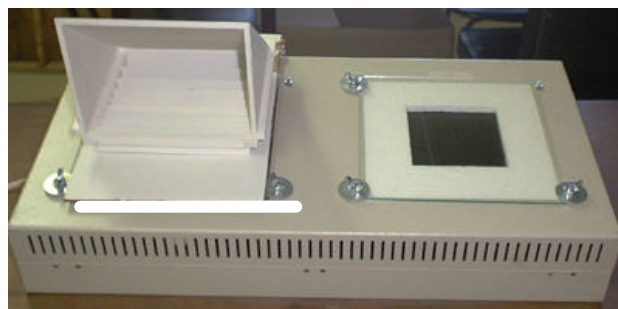
MEDIÇÕES	CONFIGURAÇÕES DO RADIÔMETRO DE ABERTURA	MEDIÇÕES	CONFIGURAÇÕES DO RADIÔMETRO DE ABERTURA
<b>Medição Térmica 1</b> → MONTAGEM 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiômetro posicionado na vertical voltado para o Norte;</li> <li>• abertura 1: prateleira de luz espelhada com vidro simples 3 mm;</li> <li>• abertura 2: vidro simples 3 mm.</li> </ul>		<b>Medição Térmica 2</b> → MONTAGEM 2: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiômetro posicionado na vertical voltado para o Norte;</li> <li>• abertura 1: veneziana espelhada fixa com vidro simples 3 mm;</li> <li>• abertura 2: vidro simples 3 mm.</li> </ul>	
<b>Medição Térmica 3</b> → MONTAGEM 3 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiômetro posicionado na vertical voltado para o Norte;</li> <li>• abertura 1: painel cortado a laser;</li> <li>abertura 2: vidro simples 3 mm.</li> </ul>		<b>Medição Térmica 4</b> → MONTAGEM 4 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiômetro posicionado na horizontal com sistema zenital voltado para o Norte;</li> <li>• abertura 1: Sistema Zenital com seleção e vidro simples 3 mm.</li> <li>• abertura 2: vidro simples 3 mm.</li> </ul>	



**FIGURA 117-** Formação 1 do Radiômetro



**FIGURA 118-** Formação 2 do Radiômetro

**FIGURA 119-** Formação 3 do Radiômetro**FIGURA 120-** Formação 4 do Radiômetro

À medida que aconteceu a aquisição dos dados através do fluxímetro, um piranômetro mediu a incidência de radiação solar direta na abertura em  $W/m^2$ , para a determinação do Fator de Solar (FS) do sistema de iluminação natural.

Assim, todas as medições térmicas (medição 1, 2, 3 e 4) foram realizadas num mesmo dia, onde serão coletados, em cada horário de medição (9 às 10h, 11 às 12 h, 13 14 h e 15 às 16 h), 12 valores de fluxo de calor proveniente de cada abertura do Radiômetro e 12 valores de incidência da radiação solar direta nas aberturas, do mesmo Radiômetro, obtidos através do Piranômetro. Durante cada medição, foram coletados valores a cada cinco segundos.

Assim com os dados coletados através do fluxímetro (transformados para potência) e do piranômetro, foi determinado o Fator Solar dos sistemas analisados. Estes dados auxiliarão a análise do desempenho térmico dos sistemas em questão.

### 3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreve uma metodologia experimental para a análise térmica e luminosa de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol.

O experimento, que consiste em uma investigação experimental sob condições de céu reais, foi dividido em dois grupos de medições:

- 1- medições dos níveis de iluminância, através de fotocélulas nos modelos em escala reduzida;
- 2- medições do fluxo de calor, que atravessa os mesmos sistemas inseridos na maquete, através do uso do Radiômetro de Abertura.

Para a determinação dos níveis de iluminância horizontal, foram utilizadas seis maquetes com ambientes idênticos, nas quais variam apenas o tipo de abertura e de sistema de iluminação natural.

Em seguida, foram realizadas medições do fluxo de calor transmitido através das aberturas do Radiômetro, configuradas com os mesmos sistemas utilizados para as medições de iluminância.

Simultaneamente à aquisição dos dados através do fluxímetro, um piranômetro mediu a incidência de radiação solar direta na abertura em  $W/m^2$ , para a determinação do Fator Solar (FS) do sistema de iluminação natural.

Os resultados experimentais térmicos e luminosos desses sistemas e algumas diretrizes de projeto para sistemas de abertura são apresentados no capítulo 4.

---

## Capítulo 4

---

# Resultados

---

<b>4 Resultados.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2 Desempenho Térmico e Luminoso dos Sistemas de Aberturas.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.1 Desempenho Luminoso dos Sistemas de Abertura.....</b>	<b>82</b>
4.2.1.1 Transmissão da Luz Através dos Sistemas de Abertura.....	88
4.2.1.2 Distribuição de Luz Natural.....	93
4.2.1.3 Comportamento dos Sistemas frente a Variação da Iluminância Externa e Ângulos de Incidência da Radiação Solar.....	97
<b>4.2.2 Desempenho Térmico dos Sistemas de Abertura.....</b>	<b>110</b>
<b>4.2.3 Síntese final e diretrizes de projeto.....</b>	<b>116</b>
<b>4.4 Conclusão.....</b>	<b>121</b>

## 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, foram realizadas as análises térmicas e luminosas, a partir dos resultados experimentais (Fatores Solares e iluminâncias horizontal interna) dos seis sistemas de iluminação natural, selecionados na metodologia (item 3): abertura lateral com vidro simples, abertura lateral com prateleira de luz espelhada, abertura lateral com veneziana, abertura lateral com painel cortado a laser (PCL), abertura zenital com vidro simples e abertura zenital com sistema de seleção angular.

Atualmente podemos encontrar uma grande diversidade de sistemas de iluminação natural que redirecionam a luz direta do sol. Boa parte deles possui geometria complexa, cujo funcionamento, apesar de peculiar a cada sistema, sempre depende das condições ambientais externas.

Vale salientar que os sistemas não foram expostos a todas as possibilidades de ângulos de incidência da radiação solar, ou seja, cada resultado, térmico (Fator Solar) e luminoso (iluminância horizontal interna) corresponde a uma determinado dia, hora e a um ângulo de incidência exato.

No decorrer do capítulo, o desempenho dos sistemas foi discutido de forma comparativa. Inicialmente, as análises térmicas e luminosas foram realizadas separadamente; em seguida, foi realizada uma síntese final que corresponde ao cruzamento das análises e dos dados térmicos e luminosos. Esta síntese teve como objetivo gerar subsídios para elaboração de diretrizes de projeto para edificações, apresentadas no final do capítulo.

## 4.2 DESEMPENHO TÉRMICO E LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURAS

Para caracterizar a performance térmica e luminosa dos sistemas de iluminação natural selecionados, foi realizada uma série de análises a partir dos seguintes itens:

- **Admissão de luz e calor.**

O excesso de luz natural no ambiente pode causar efeitos adversos sobre o ambiente térmico (superaquecimento), ambiente luminoso (ofuscamento) e integridade física dos materiais. Cabe aos sistemas de iluminação (entre outras atribuições) propiciar um equilíbrio entre admissão de luz natural e transmissão do fluxo de calor. Assim, será analisada a redução ou aumento dos níveis de iluminância e do fluxo de calor no ambiente interno, proporcionado pelos sistemas de iluminação natural.

- **Capacidade de distribuição de luz natural.**

Os sistemas que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem não controlam a radiação solar de forma efetiva e distribuem luz de forma não uniforme. A má distribuição da luz pode gerar pontos, em um mesmo ambiente, com excesso e deficiência de luminosidade, simultaneamente. Assim, será observada a distribuição da luz no ambiente, proporcionado pelos sistemas de iluminação analisados durante o dia.



- **Comportamento frente à variação da iluminância externa, diferentes tipos de céu e ângulos de incidência da radiação solar.**

O ambiente interno é consequência do ambiente externo; no entanto, cada sistema de iluminação responde de forma peculiar diante da variação da iluminância externa, diferentes tipos de céu e ângulos de incidência da radiação solar. Sistemas de abertura que possuem bom desempenho sob condições de céu encoberto podem ser ineficientes em dias ensolarados; já os dispositivos de sombreamento (fixos ou móveis) e/ou fechamentos envidraçados podem minimizar esses efeitos. Assim, pretende-se analisar a influência de diferentes condições externas sobre o desempenho térmico e luminoso proporcionado por cada sistema analisado.

Vale salientar que os sistemas de abertura lateral e zenital com vidro simples, únicos que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem, foram utilizados, no decorrer do capítulo, como referência para a comparação entre os sistemas.

#### **4.2.1 DESEMPENHO LUMINOSO DOS SISTEMAS DE ABERTURA**

Como já havia sido citado na Metodologia (item 3), foram realizadas medições dos níveis de iluminância, nos modelos em escala reduzida, orientadas para Norte, sob reais condições ambientais, durante os seguintes horários:

- 9 às 10 h;
- 11 às 12 h;
- 13 às 14 h;
- 15 às 16 h.

Foram realizados 5 dias de medições:

- 1º - Dia 04/10/2001, sob condições parcialmente de céu encoberto;
- 2º - Dia 05/10/2001, sob condições de céu encoberto;
- 3º - Dia 10/10/2001, sob condições de céu claro;
- 4º - Dia 11/10/2001, sob condições de céu claro;
- 5º - Dia 12/10/2001, sob condições de céu claro.

Os dados da primeira medição não foram levados em consideração, devido à grande variabilidade dos valores de iluminância medidos.

Inicialmente, foram elaborados gráficos para avaliar a variação dos resultados encontrados nos três dias de medição, sob condições de céu claro. Nos gráficos das figuras 121 (dia 10/11/2001), 122 (dia 11/10/2001) e 123 (dia 12/11/2001), foram traçados os valores de iluminância média horizontal interna (lux), proporcionada por cada sistema analisado, nos quatro horários de medição.

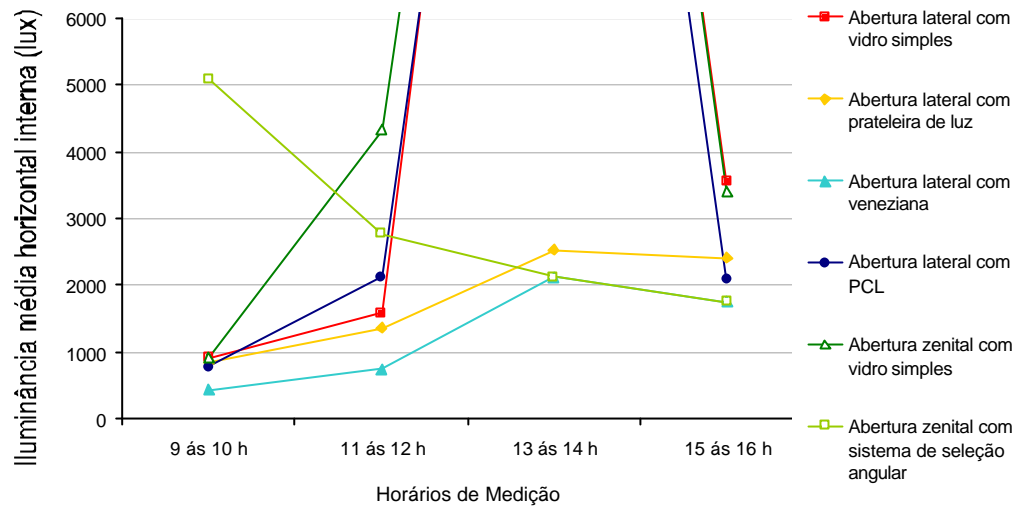


FIGURA 121- Valores médios de iluminância horizontal interna (lux) de cada maquete analisada no dia 10/10/2001.

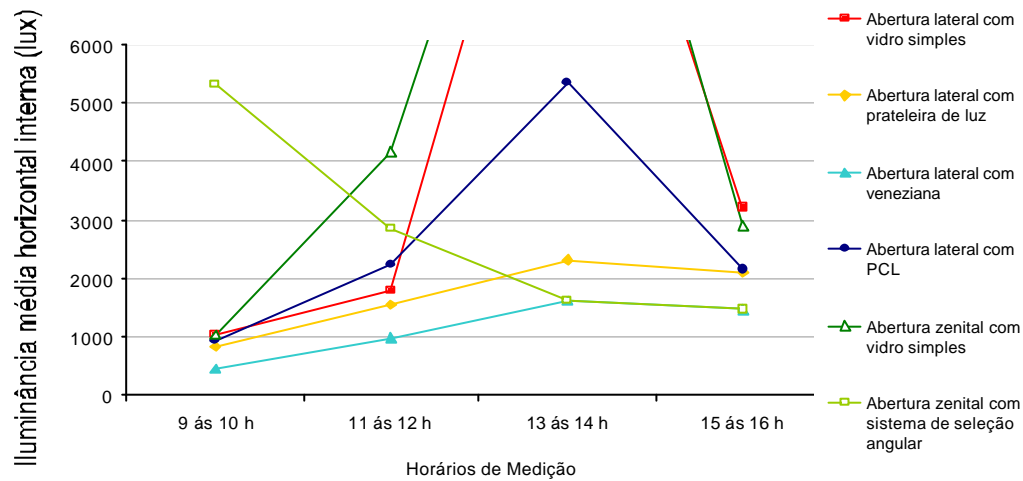


FIGURA 122- Valores médios de iluminância horizontal interna (lux) de cada maquete analisada no dia 11/10/2001.

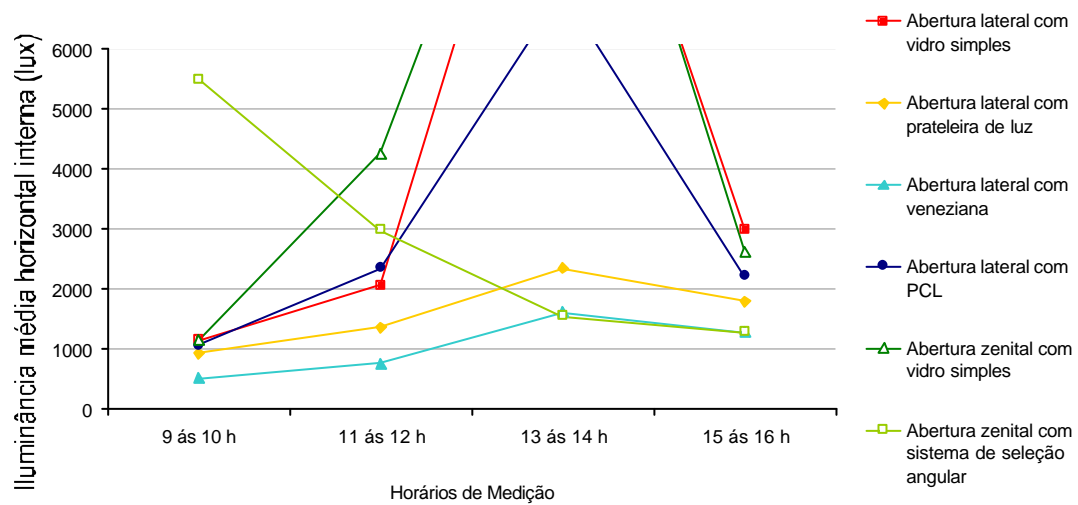


FIGURA 123- Valores médios de iluminância horizontal interna (lux) de cada maquete analisada no dia 12/10/2001.

Analisando as figuras 121, 122 e 123, percebe-se a ocorrência de repetibilidade da maior parte dos resultados, com pequenas variações nos valores, principalmente nos horários das 11 às 12 h e das 13 às 14 h.

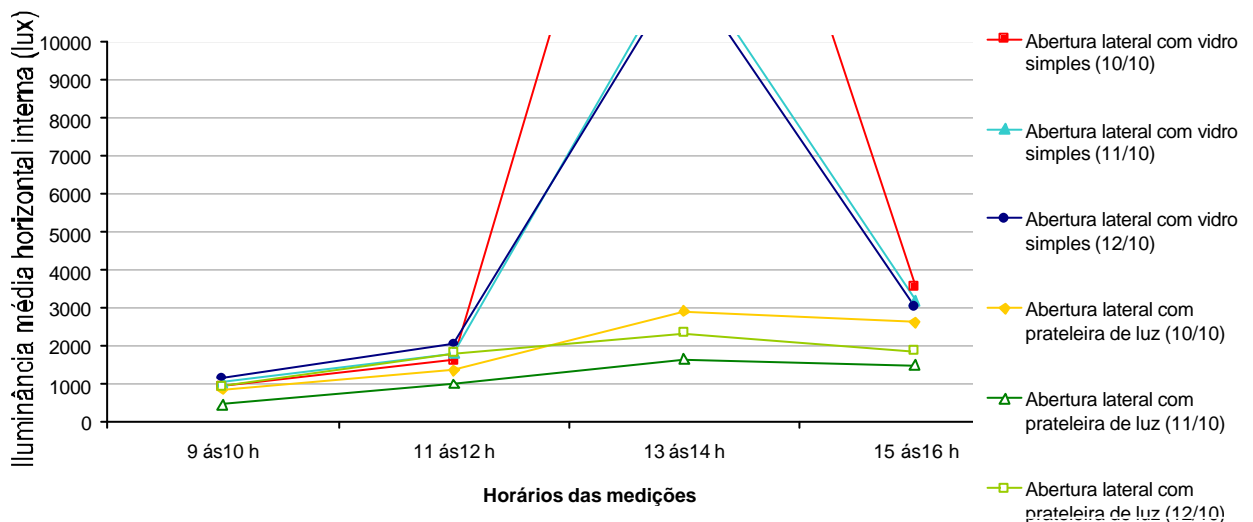
Para avaliar melhor essas variações, foram elaborados gráficos independentes, para cada sistema de iluminação analisado, englobando os mesmos valores de iluminância média horizontal, ilustrados nas figuras 121, 122, 123.

No gráfico da figura 124, foram traçados os valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com prateleira de luz e com vidro simples, nos quatro horários e durante os três dias de medição.

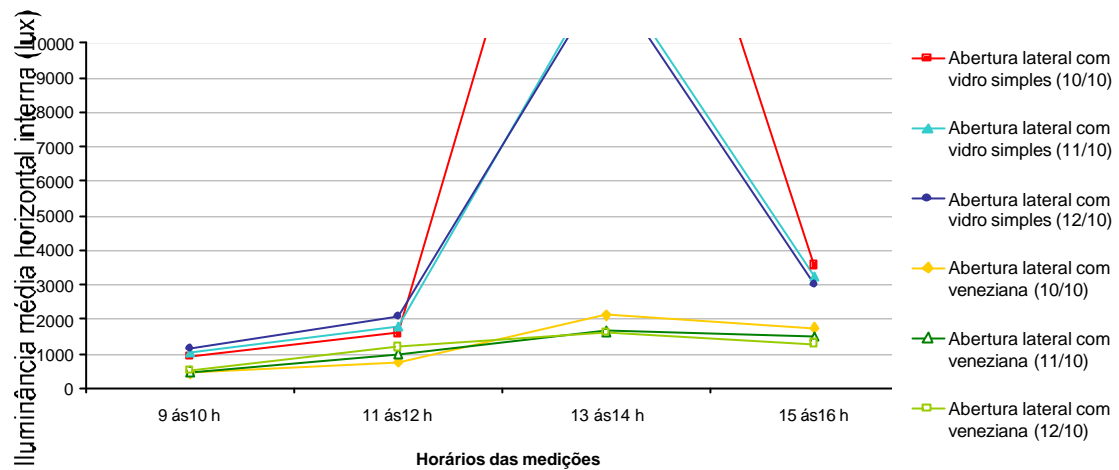
No gráfico da figura 125, foram traçados os valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com veneziana e com vidro simples, nos quatro horários e durante os três dias de medição.

No gráfico da figura 126, foram traçados os valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com PCL e com vidro simples, nos quatro horários e durante os três dias de medição.

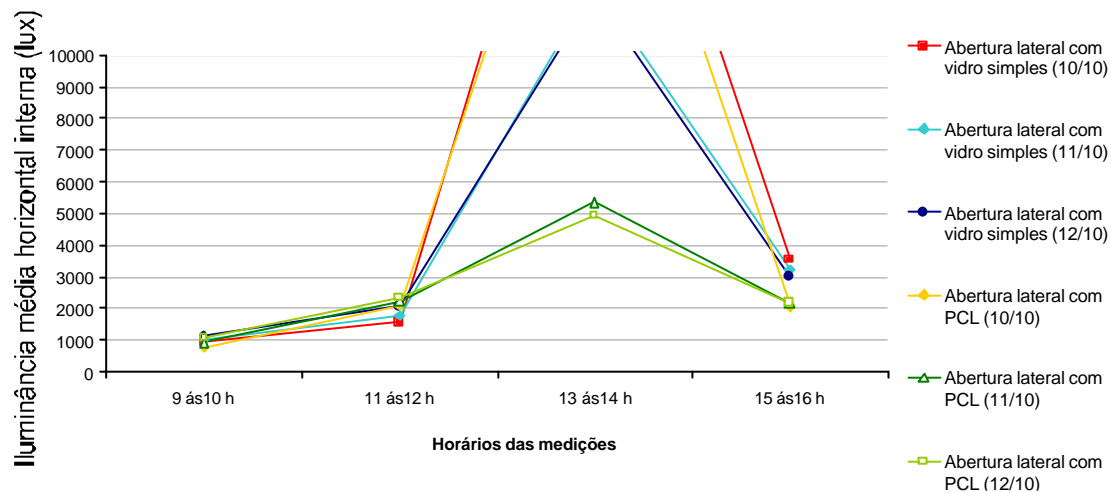
No gráfico da figura 127, foram traçados os valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelos sistemas de abertura zenital com vidro simples e com sistema de seleção angular, nos quatro horários e durante os três dias de medição.



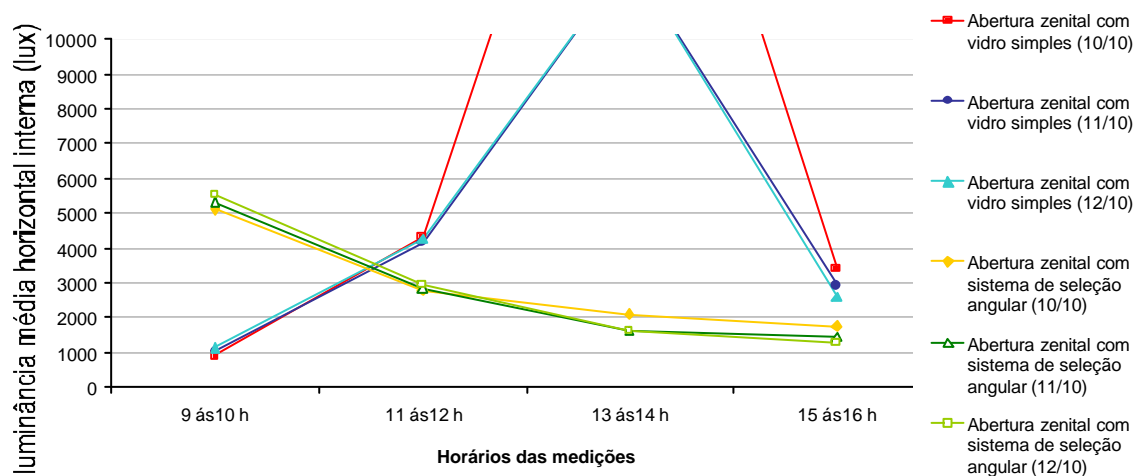
**FIGURA 124-** Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com prateleira de luz espelhada e com vidro simples - céu claro.



**FIGURA 125-** Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com veneziana e com vidro simples - céu claro.



**FIGURA 126-** Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas laterais com PCL e com vidro simples - céu claro.



**FIGURA 127-** Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas zenitais com vidro simples e com sistema de seleção angular - céu claro.

A princípio, esperava-se encontrar os mesmos valores de iluminância para os três dias de medição, visto que os modelos em escala, mesmo em dias diferentes, foram expostos às mesmas condições ambientais. Mas, de acordo com Moore (1991), essa é uma das limitações básicas quando se faz medições em céu real, pois, em dois dias idênticos, as medições de luminância do céu varia normalmente mais de 15%.

Nos três dias de medição, ilustrados pelas figuras 124, 125, 126 e 127 as maiores variações de valores ocorreram com os seguintes sistemas:

- Abertura lateral com vidro simples, no horário das 13 às 14 h, onde o valor do terceiro dia de medição foi 46% menor do que o valor encontrado no primeiro dia de medição.
- Abertura lateral com prateleira de luz espelhada, nos horários das 9 às 10 h e das 11 às 12 h, onde o valor do segundo dia de medição foi, respectivamente, 51% e 45% menor do que o valor encontrado no terceiro de medição.
- Abertura lateral com veneziana, no horário das 11 às 12 h, onde o valor do segundo dia de medição foi 36% menor do que o valor encontrado no terceiro de medição.
- Abertura lateral com PCL, no horário das 13 às 14 h, onde o valor do terceiro dia de medição foi 76% menor do que o valor encontrado no primeiro dia de medição.
- Abertura zenital com vidro simples, no horário das 13 às 14 h, onde o valor do terceiro dia de medição foi 44% menor do que o valor encontrado no primeiro dia de medição.

Sabendo que a iluminância interna varia de acordo com o ângulo de incidência da radiação solar direta e com iluminância global externa, podemos supor que as variações encontradas de um dia para o outro ocorreram, provavelmente, devido:

- à variação de iluminância externa – que acontece mesmo em dias idênticos;
- à variação do ângulo de incidência da radiação solar direta, uma vez que as medições, apesar de realizadas em um mesmo intervalo de tempo (hora), não foram realizadas precisamente nos mesmos minutos e segundos.

Apesar da ocorrência dessas variações, também foi medida uma grande quantidade de valores com menos de 20% de variação, comparando dois dias de medições, como indica a tabela 12.

Sabe-se que, para obter maior precisão dos dados, seriam necessários mais medições; no entanto, acredita-se na validade dos valores encontrados nas medições apresentadas, uma vez que este trabalho visa realizar apenas uma análise qualitativa comparativa entre os sistemas de iluminação e não uma análise quantitativa.

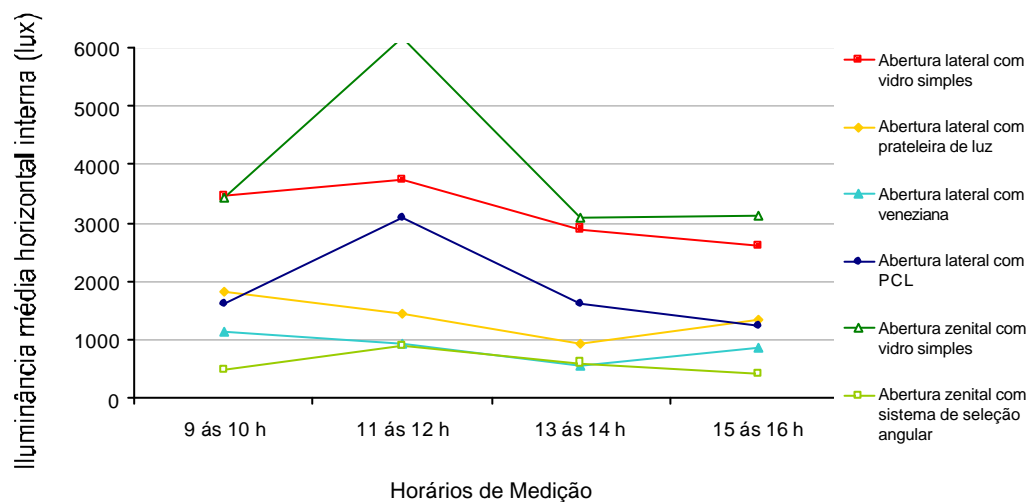
**TABELA 12** – Menores variações dos valores de iluminância média horizontal interna encontrada em dois dias de medições (sublinhados).

Iluminância média horizontal interna (lux)				
Sistema de iluminação natural	Horários das medições			
	9-10 h	11 –12 h	13-14 h	15-16 h
Abertura lateral com vidro simples (10/10)	910.94	<u>1585.38</u>	22006.83	3544.42
Abertura lateral com vidro simples (11/10)	<u>1031.98</u>	<u>1785.55</u>	12290.94	3206.71
Abertura lateral com vidro simples (12/10)	<u>1142.81</u>	2058.64	<u>11958.00</u>	<u>2999.12</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>9.7%</b>	<b>11.2%</b>	<b>2.7%</b>	<b>6.5%</b>

Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol

Prateleira de luz (10/10)	<u>836.18</u>	<u>1355.20</u>	<u>2528.90</u>	2620.48
Prateleira de luz (11/10)	<u>451.90</u>	<u>974.63</u>	<u>1626.39</u>	<u>1476.97</u>
Prateleira de luz (12/10)	<u>914.57</u>	<u>1684.50</u>	<u>2341.50</u>	<u>1783.91</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>8.6%</b>	<b>19.5%</b>	<b>7.4%</b>	<b>17.2%</b>
Veneziana (10/10)	<u>418.84</u>	<u>745.24</u>	<u>2112.92</u>	<u>1738.82</u>
Veneziana (11/10)	<u>451.90</u>	<u>974.63</u>	<u>1626.39</u>	<u>1476.97</u>
Veneziana (12/10)	<u>488.74</u>	<u>1165.95</u>	<u>1598.00</u>	<u>1271.36</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>7.3%</b>	<b>16.4%</b>	<b>1.7%</b>	<b>13.9%</b>
PCL (10/10)	<u>786.50</u>	<u>2121.15</u>	<u>20420.71</u>	<u>2084.65</u>
PCL (11/10)	<u>936.82</u>	<u>2247.33</u>	<u>5359.76</u>	<u>2160.18</u>
PCL (12/10)	<u>1065.31</u>	<u>2343.37</u>	<u>4938.00</u>	<u>2194.68</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>12.1%</b>	<b>4.1%</b>	<b>7.9%</b>	<b>1.6%</b>
Abertura zenital com vidro simples (10/10)	<u>910.94</u>	<u>4326.05</u>	<u>22006.83</u>	<u>3416.98</u>
Abertura zenital com vidro simples (11/10)	<u>1031.98</u>	<u>4161.62</u>	<u>13289.50</u>	<u>2908.44</u>
Abertura zenital com vidro simples (12/10)	<u>1142.81</u>	<u>4262.00</u>	<u>12290.94</u>	<u>2606.52</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>9.7%</b>	<b>2.4%</b>	<b>7.5%</b>	<b>10.4%</b>
Abertura zenital com sistema de seleção angular (10/10)	<u>5085.71</u>	<u>2776.57</u>	<u>2112.92</u>	<u>1738.82</u>
Abertura zenital com sistema de seleção angular (11/10)	<u>5323.38</u>	<u>2852.00</u>	<u>1626.39</u>	<u>1476.97</u>
Abertura zenital com sistema de seleção angular (12/10)	<u>5505.83</u>	<u>2959.00</u>	<u>1531.28</u>	<u>1271.36</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>3.3%</b>	<b>2.6%</b>	<b>5.8%</b>	<b>13.9%</b>

Também foram realizadas medições sob condições de céu encoberto e os resultados de iluminância média horizontal interna, proporcionada pelos sistemas de iluminação são mostrados no gráfico da figura 128.



**FIGURA 128-** Valores médios de iluminância horizontal interna, proporcionados pelas aberturas zenitais com vidro simples e com sistema de seleção angular - céu encoberto.

No entanto, não pode ser feita a mesma análise de repetibilidade, realizada para os valores medidos sob condições de céu claro, uma vez que só foi realizado um dia de medição sob condição de céu encoberto.

Apesar de os valores representativos das condições de céu encoberto estarem mais sujeitos a erros, do que os valores que representam a condição de céu claro, acredita-se que será válida a

utilização dessas medições, objetivando avaliar o comportamento dos sistema de iluminação natural diante da ausência da radiação solar direta.

A princípio, observando as figuras 121, 122, 123 e 128, percebe-se que a prateleira de luz espelhada, a veneziana, o PCL e o sistema de iluminação zenital reduzem o nível de iluminância interna, tanto em condições de céu claro, como encoberto, quando comparados com os sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, como elemento de passagem. No próximo item, esse aspecto será analisado de forma mais detalhada.

4.2.1.1 ADMISSÃO DE LUZ ATRAVÉS DOS SISTEMAS DE ABERTURA.

Para facilitar a visualização da redução do nível de iluminância interna proporcionado pelos sistemas de abertura, foram elaborados gráficos com barras, onde foram traçados os valores de iluminância horizontal interna (correspondente a médias dos três dias de medição) de todos os sistemas analisados, nos quatro horários de medição.

No gráfico da figura 129, foram traçados os valores médios de iluminância interna, obtidos nos três dias de medições, sob condição de céu claro.

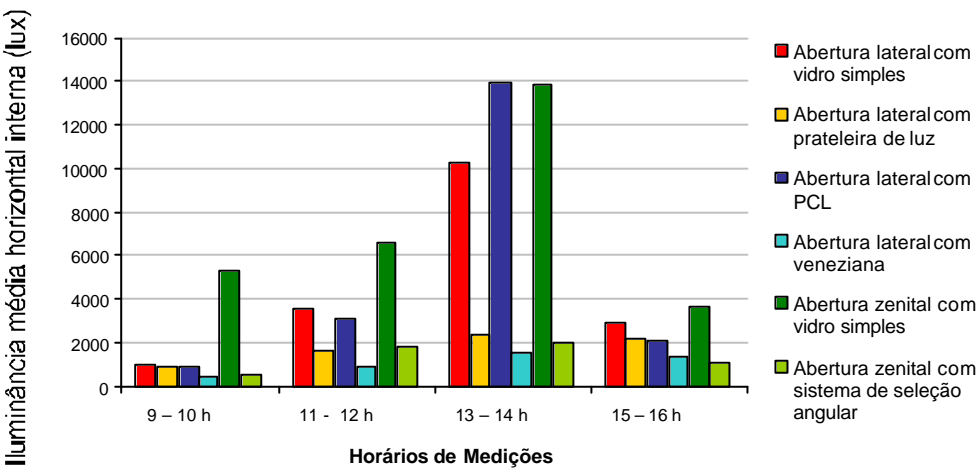


FIGURA 129- Valores médios de iluminância horizontal interna de todos os sistemas de iluminação natural analisados - céu claro.

TABELA 13 – Valores médios de iluminância horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu claro.

Média das iluminâncias horizontais internas encontras nos três dias de medição (lux).						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz espelhada	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	1038	908	457	923	5295	613
11 às 12 h	3562	1678	947	3079	6579	1839
13 às 14 h	10284	2464	1591	13919	13842	1996
15 às 16 h	2891	2187	1428	2144	3731	1139

Como já era esperado, pode-se perceber, na figura 129 e na tabela 13, sob condição de céu claro, os sistemas de iluminação natural, que utilizam apenas o vidro simples, são os que proporcionam os maiores níveis de iluminância interna.

O sistema zenital com vidro simples é o sistema que proporciona os maiores níveis de iluminância horizontal; em segundo lugar, fica a abertura lateral com vidro simples; em seguida, em ordem decrescente, estão a abertura lateral com PCL, a abertura lateral com prateleira de luz espelhada, a abertura zenital com sistema de seleção angular e, por último, como o sistema que proporciona os menores níveis de iluminância, está a abertura lateral com veneziana.

A maior parte dos ambientes internos das maquetes recebem mais luz no período das 13 às 14 h e menos luz no período das 9 às 10 h. Apenas o ambiente iluminado pela abertura zenital com vidro simples recebe menos luz no período das 15 às 16 h.

De acordo com a tabela 14, quando comparados com os sistemas de abertura lateral e zenital com vidro simples, os outros quatro sistemas analisados reduzem, durante a maior parte do dia, o nível de iluminância no ambiente.

**TABELA 14** – Redução em porcentagem do nível de iluminância interna com relação aos sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu claro.

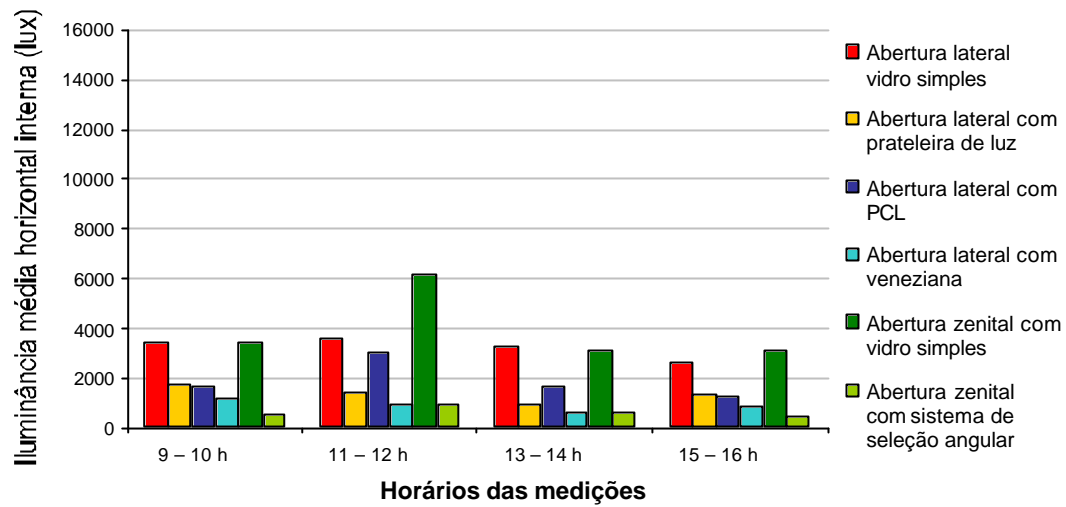
<b>Redução em porcentagem do nível de iluminância interna (%)</b>				
Horários das medições	Em relação ao sistema de abertura lateral com vidro simples			Em relação ao sistema de abertura zenital com vidro simples
	Prateleira de luz	Veneziana	PCL	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	12.6 %	56.0%	11.1%	88.4%
11 às 12 h	52.9%	73.4%	13.6%	72.0%
13 às 14 h	76.0%	84.5%	-35.3%	85.6%
15 h às 16 h	24.4%	50.6%	25.8%	69.5%

Comparando os sistemas analisados, percebe-se que as maiores reduções do nível de iluminância interna são proporcionadas pela abertura zenital com sistema de seleção angular, que reduz em torno de 69.5% a 88.4%; e as menores reduções são proporcionadas pelo sistema de abertura lateral com o PCL, com reduções variando entre - 35.3% e 25.8%. O PCL aumentou em 35.3% o nível de iluminância interna, aparentemente esse resultado deve-se a sensibilidade angular do sistema que acabou enviando uma certa quantidade de luz para o ambiente.

A prateleira de luz e a veneziana proporcionam suas maiores reduções de luz no período compreendido entre as 13 às 14 h. Curiosamente, nesse mesmo período, o PCL aumenta o nível de iluminância interno.

No gráfico da figura 130, foram traçados os valores de iluminância interna obtidos nas medições sob condição de céu encoberto.





**FIGURA 130-** Valores médios de iluminância horizontal interna de todos os sistemas de iluminação natural analisados - céu encoberto.

**TABELA 15** – Valores médios de iluminância horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu encoberto.

Média das iluminâncias horizontais internas encontras nos três dias de medição (lux).						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	3459	1809	1141	1625	3440	495
11 às 12 h	3562	1458	918	3079	6152	895
13 às 14 h	3274	944	577	1624	3101	600
15 às 16 h	2598	1346	860	1242	3116	431

Observa-se, no gráfico da figura 130 e na tabela 15, que, em condição de céu encoberto, os sistemas de iluminação natural que utilizam apenas o vidro simples continuam proporcionando os maiores níveis de iluminância interna.

No entanto, a ordem dos sistemas que admitem o acesso de mais ou menos luz foi levemente modificada, em relação às medições sob condição de céu claro. Agora o sistema que recebe menos luz é a abertura zenital com sistema de seleção angular e não a veneziana, como em condição de céu claro.

Neste experimento, verificou-se que os ambientes iluminados pelas aberturas laterais com prateleira de luz e veneziana recebem mais luz no período das 9 às 10 h e menos luz no período das 13 às 14 h. Já os ambientes iluminados pela abertura lateral com PCL e pela abertura zenital com sistema de seleção angular recebem mais luz no período das 11 às 12 h e menos luz no período das 15 às 16 h.

Comparando com os sistemas de referência, verifica-se que as aberturas laterais com prateleira de luz, veneziana, PCL e a abertura zenital com sistema de seleção angular continuam reduzindo o nível de iluminância interno (assim como em condição de céu claro), como mostra a tabela 16.

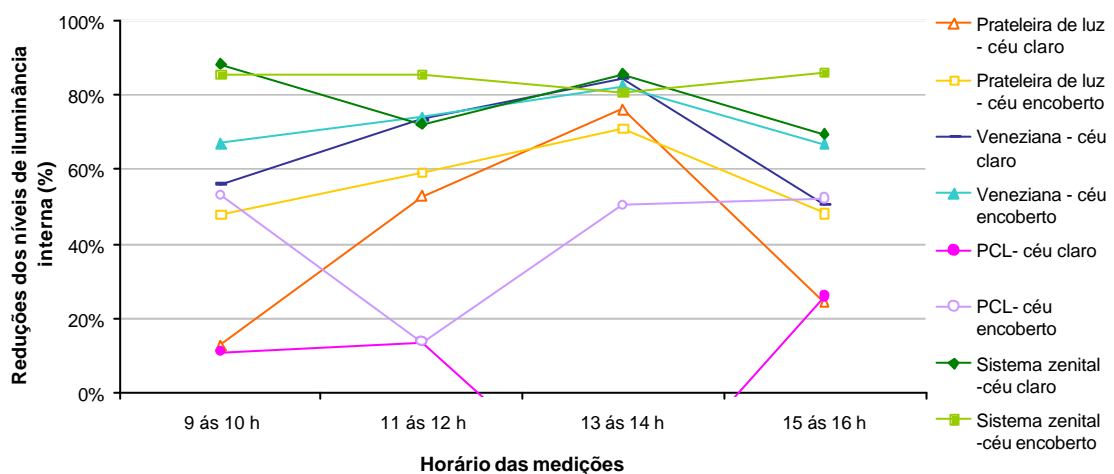
**TABELA 16** – Redução em porcentagem do nível de iluminância interna com relação a sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu encoberto.

Redução em porcentagem do nível de iluminância interna (%)				
Horários das medições	Em relação ao sistema de abertura lateral com vidro simples			Em relação ao sistema de abertura zenital com vidro simples
	Prateleira de luz	Veneziana	PCL	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	47.7%	67.0%	53.0%	85.6%
11 às 12 h	59.1%	74.2%	13.6%	85.5%
13 às 14 h	71.2%	82.4%	50.4%	80.6%
15 às 16 h	48.2%	66.9%	52.2%	86.2%

A abertura zenital com sistema de seleção angular continua sendo o sistema que mais reduz o nível de iluminância interna, variando entre 80.6% a 86.2% e o PCL, o que menos reduz, variando entre 13.6% e 53%.

As aberturas laterais com prateleira de luz e a com veneziana continuam proporcionando suas maiores reduções de luz no período compreendido entre as 13 às 14 h. Nesse mesmo período, o PCL já não aumenta o nível de iluminância interno (como ocorreu com o céu claro) e sim reduz em 50%.

O gráfico da figura 131 mostra a redução, em porcentagem (%), do nível de iluminância interna, proporcionado pela prateleira de luz, veneziana, pelo PCL, com relação à abertura lateral com vidro simples e pelo sistema zenital, com relação à abertura zenital com vidro simples, nos quatro horários de medição, sob condições de céu claro e encoberto.



**FIGURA 131-** Redução (%) do nível de iluminância interna proporcionado pelas aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, veneziana, PCL, com relação à abertura lateral com vidro simples e pela abertura zenital com sistema de seleção angular, com relação à abertura zenital com vidro simples- céu claro e encoberto.

A partir desse gráfico, pode-se realizar uma síntese a respeito da capacidade de transmitância da luz de cada sistema, diante das condições de céu claro e encoberto.

➤ **Abertura lateral com prateleira de luz espelhada:**

- propicia as suas maiores reduções nos períodos das 11 às 12 h e das 13 às 14 h e as suas menores reduções nos períodos das 9 às 10 h e das 15 às 16 h, mesmo quando exposta a diferentes tipos de céu;

- no geral, proporciona mais redução de iluminância interna quando exposta à condição de céu encoberto do que quando exposta à condição de céu claro. Essa diferença fica mais evidente no início da manhã e no final da tarde.

➤ **Abertura lateral com veneziana:**

- propicia as suas maiores reduções nos períodos das 11 às 12 h e das 13 às 14 h e as suas menores reduções nos períodos das 9 às 10 h e das 15 às 16 h, mesmo quando exposta a diferentes tipos de céu;
- proporciona mais redução de iluminância interna quando exposta à condição de céu encoberto do que quando exposta à condição de céu claro. Essa diferença fica mais evidente no início da manhã e no final da tarde;
- comparando o comportamento da veneziana com o da prateleira de luz, pode-se perceber que, apesar de esses sistemas admitirem mais ou menos luz nos mesmos horários, eles proporcionam níveis de iluminâncias internas diferentes. Quando colocados sob as mesmas condição de céu, a veneziana sempre, em todos os horários de medição, proporciona mais redução do nível de iluminância interna do que a prateleira de luz.

➤ **Abertura lateral com painel cortado a laser:**

- dos sistemas estudados, com exceção dos sistemas de referência, o PCL é o que menos reduz o nível de iluminância interna, mesmo quando exposta a diferentes tipos de céu;
- proporciona mais redução de iluminância interna quando exposto a condição de céu encoberto do que quando exposto a condição de céu claro.

➤ **Abertura zenital com sistema de seleção angular:**

- dos sistemas analisados, este é o sistema que mais reduz o nível de iluminância interna no ambiente, sendo essa redução um pouco maior em dias de céu encoberto. Interessante notar que o sistema de abertura zenital com vidro simples é o sistema que proporciona maiores níveis de iluminância interna, na maior parte do dia, tanto em condição de céu claro quanto em condição de céu encoberto.

Tanto a prateleira de luz espelhada, como a veneziana, o PCL e o sistema zenital reduzem o nível de iluminância interna, principalmente quando expostos à condição de céu encoberto.

Boa parte dessa redução é consequência do sombreamento proporcionado pelos sistemas, uma vez que são projetados para excluir de forma total ou parcial (PCL) a luz direta do sol. No entanto, parte da luz difusa, proveniente de alturas mais elevadas do céu, também é excluída, ocasionando uma maior redução da iluminância no ambiente interno.

Vale salientar que tanto a prateleira de luz quando a veneziana proporcionam maiores reduções de iluminâncias nos períodos em que os ambientes internos receberiam excesso de luminosidade, caso eles fosse iluminados apenas com vidro simples. Justamente nesses horários, o PCL proporciona as

suas menores reduções. Já o sistema zenital com seleção angular, não proporciona muita variação, como relação à redução de iluminância durante o dia.

Apesar das reduções dos níveis de iluminância interna, ocasionadas pelos quatro sistemas citados anteriormente, a grande maioria dos valores médios encontrados nas medições, foi superior a 500 lux. De acordo com a norma NB-57 (ABNT 1990), que especifica valores de iluminâncias para interiores, 500 lux é o valor médio utilizado para salas de aula, salas de leitura, escritórios, entre outros. Foram encontrados apenas três valores de iluminância média abaixo desse valor: o primeiro de 457 lux, proporcionado pela abertura lateral com veneziana no período das 9 às 10 h, sob condições de céu claro, segundo e o terceiro de 495 e 431 lux, proporcionado pelo sistema de iluminação zenital, nos períodos das 9 às 10 h e das 15 às 16 h, respectivamente, sob condições de céu encoberto.

Também foram encontrados, durante o dia, valores de iluminância média acima de 2000 lux, proporcionados em três horários de medições pela abertura lateral com vidro simples, em dois horários pela prateleira de luz, em três horários pela abertura lateral com PCL e em quatro horários pela abertura zenital com vidro simples. De acordo com Lida (1997), até 1000 lux o rendimento visual cresce enquanto a fadiga visual decresce. A partir desse ponto até 2000 lux há um aumento discreto do rendimento visual com um acréscimo da fadiga visual. Ultrapassando os 2000 lux o rendimento visual tende a permanecer constante, com um aumento da fadiga visual. Por isso que somente em situações especiais utiliza-se níveis de iluminação maiores que 2000 lux.

Vale salientar que, neste trabalho, não será realizada uma análise quantitativa mais detalhada dos níveis de iluminância interna, uma vez que foram realizadas poucas medições, em apenas um período do ano.

No entanto, em locais onde o nível de iluminância externa é alto, fica claro que, bem dimensionados, parte desses sistemas são capazes de controlar a radiação solar, de forma a redirecioná-la e introduzi-la em pequena quantidade, suficiente para a iluminação do ambiente interno, evitando maiores problemas provenientes do excesso de luminosidade.

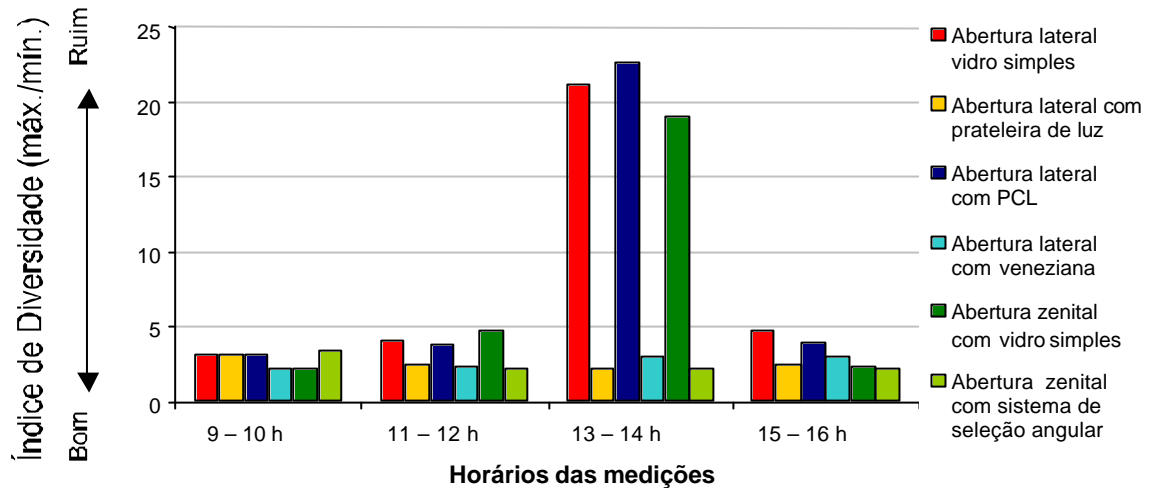
#### 4.2.1.2 DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL

Sabe-se que, para otimizar o uso da iluminação natural, além de controlar, os sistemas devem ter a capacidade de melhorar a uniformidade da luz no ambiente interno. Objetivando quantificar a distribuição de luz proporcionado por cada sistema, foi utilizado o índice de diversidade, (*Diversity of Illuminance* - CIBSE, 1994) calculado pela divisão da máxima iluminância pela mínima iluminância, encontrada em um ambiente interno, no mesmo período de medição.

Foram elaborados gráficos correspondentes às figuras 132 e 133, onde foram traçados os índices de diversidade calculados para cada sistema, em cada período de medição (quanto menor o índice maior a uniformidade no ambiente). No gráfico da figura 132, foram traçados os valores medidos sob condição de céu claro.

**TABELA 17** – Índices de diversidade (Iluminância máx./ Iluminância mín.), para cada sistema, sob condição de céu claro.

Índices de uniformidade						
Horários de medições	Abertura lateral com vidro simples	Prateleira de luz espelhada	Veneziana	PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	3.22	3.18	2.14	3.19	2.31	3.56
11 às 12 h	4.11	2.45	2.42	3.91	4.75	2.24
13 às 14 h	21.20	2.30	3.08	22.73	19.00	2.16
15 às 16 h	4.79	2.59	2.99	3.99	2.35	2.32

**FIGURA 132**- Índices de diversidade - para cada sistema - céu claro.

De acordo com a figura 132 e com a tabela 17, as aberturas laterais com vidro simples e com PCL e a abertura zenital com vidro simples são os sistemas que possuem os maiores índices de diversidade, ou seja, proporcionam uma iluminação menos uniforme no ambiente.

A má distribuição da luz é intensificada no período das 13 às 14 h, justamente no mesmo período em que esses sistemas admitem o acesso de uma maior quantidade de radiação solar direta.

Quando comparado ao vidro simples, o PCL tem melhor desempenho durante a maior parte do dia, devido a sua capacidade de bloquear e redistribuir parte da radiação solar incidente. No entanto, ainda admite a entrada da radiação solar direta, assim como os sistemas de aberturas lateral e zenital com vidro simples.

A não obstrução total da radiação solar direta gera uma distribuição de luz no ambiente interno submetida às características direcionais da luz natural. No caso de ambientes iluminados lateralmente, os níveis de iluminação decrescem com o aumento da distância da janela, devido à direção predominante da luz solar – de cima para baixo.

Já os outros três sistemas analisados, as aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e a abertura zenital com sistema de seleção angular possuem elementos que controlam a radiação solar, responsáveis pelo sombreamento e redirecionamento de radiação solar direta. Esses elementos proporcionam uma distribuição de luz mais uniforme, com pouca variação da distribuição interna da luz durante o dia.

A tabela 18 mostra a redução em porcentagem do índice de diversidade proporcionado pelos sistemas de iluminação sob condição de céu claro. Foram tomados como referência os sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem.

**TABELA 18** – Reduções em porcentagem do índice de diversidade, sob condição de céu claro.

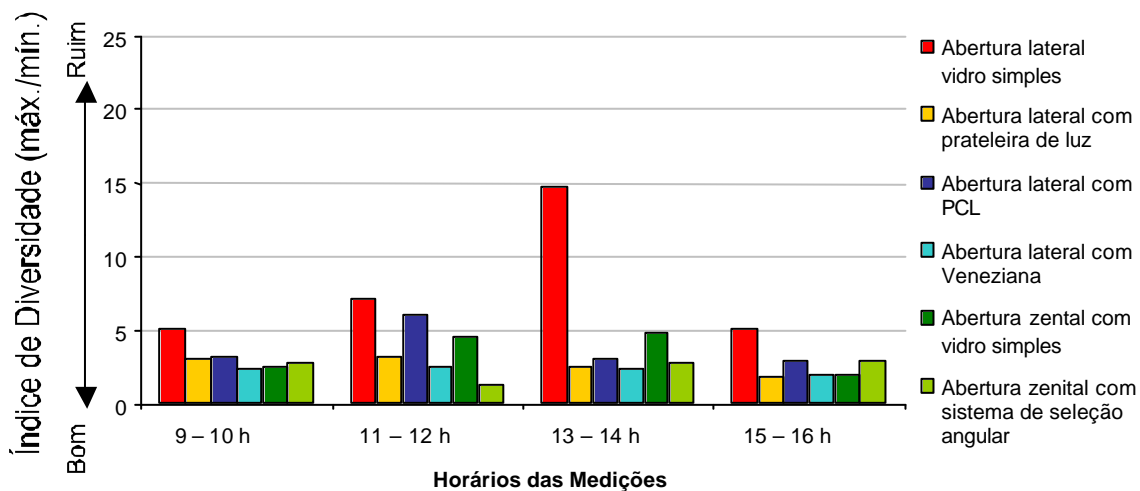
Reduções em porcentagem do índice de diversidade (%)				
Horários das medições	Em relação ao sistema de abertura lateral com vidro simples			Em relação ao sistema de abertura zenital com vidro simples
	Prateleira de luz	Veneziana	PCL	Sistema de seleção angular
9 às 10 h	1%	34%	1%	-54%
11 às 12 h	40%	41%	5%	53%
13 às 14 h	89%	85%	-7%	89%
15 às 16 h	46%	38%	17%	1%

A tabela 18 ilustra um dos maiores benefícios, ao ambiente iluminado, proporcionados pela prateleira de luz, pela veneziana, pelo PCL e pelo sistema zenital com seleção angular. Durante a maior parte do dia, esses sistemas melhoram a distribuição da luz natural no ambiente.

Algumas melhorias são mais significativas, como é o caso da prateleira de luz e da veneziana que melhoram a uniformidade no ambiente entorno de 89 e 85%, respectivamente, no período das 13 às 14 h. Outras menos significativas, como é o caso da prateleira de luz e do PCL que diminuíram em apenas 1% o índice de diversidade no período das 9 às 10 h.

No entanto, foram detectadas apenas duas situações em que ocorreu um aumento do índice de diversidade no ambiente. Foi o caso da abertura lateral com PCL que aumentou em 7%, no período das 13 às 14 h e do sistema zenital com seleção angular, que aumentou em 54%, no período das 9 às 10 h.

Objetivando dar continuidade às análises com relação à distribuição da luz, proporcionada pelos sistemas de iluminação natural, foi elaborado o gráfico da figura 133, onde foram traçados os índices de diversidade, agora calculados a partir de valores medidos sob condição de céu encoberto.



**FIGURA 133**- Índices de diversidade, para cada sistema -céu encoberto

**TABELA 19** – Índices de diversidade, para cada sistema, sob condição de céu encoberto.

<b>Índices de diversidade</b>						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com sistema de seleção angular
9 às 10 h	5.16	3.04	2.30	3.21	2.52	2.78
11 às 12 h	7.09	3.20	2.54	6.02	4.55	1.24
13 às 14 h	14.71	2.55	2.43	3.06	4.90	2.83
15 às 16 h	5.08	1.89	2.03	2.94	1.93	2.93

De acordo com a figura 133 e com a tabela 19, percebe-se que, mesmo na ausência da radiação solar direta, as aberturas lateral e zenital com vidro simples continuam sendo os sistemas que possuem os maiores índices de diversidade.

As aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e a abertura zenital com sistema de seleção angular continuam sendo os sistemas que proporcionam uma distribuição de luz mais uniforme, com pouca variação da distribuição interna durante o dia.

Devido à ausência da radiação solar direta, o PCL melhorou o seu desempenho com relação à distribuição da luz natural em dias de céu claro. No entanto, obteve índices de diversidade mais altos do que os índices obtidos pelos três sistemas mencionados no parágrafo anterior, durante todos os períodos de medição.

A tabela 20 mostra a redução em porcentagem do índice de diversidade, sob condição de céu encoberto. Foram tomados como referência os sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem.

**TABELA 20** – Redução, em porcentagem, da diversidade com relação aos sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples, sob condição de céu encoberto.

<b>Redução em porcentagem do índice de diversidade (%)</b>				
Horários de medições	Em relação ao sistema de abertura lateral com vidro simples			Em relação ao sistema de abertura zenital com vidro simples
	Prateleira de luz	Veneziana	PCL	Sistema de seleção angular
9 às 10 h	41%	55%	38%	-10%
11 às 12 h	55%	64%	15%	73%
13 às 14 h	83%	83%	79%	42%
15 às 16 h	63%	60%	42%	-52%

Com a tabela 20, fica evidente que as aberturas laterais com prateleira de luz, com veneziana e com PCL continuam melhorando a distribuição da luz natural durante a maior parte do dia, mesmo diante da ausência da radiação solar direta.

As melhorias mais significativas continuam sendo as da prateleira de luz e da veneziana que agora melhoram a uniformidade no ambiente entorno de 83%, ainda no período das 13 às 14 h.

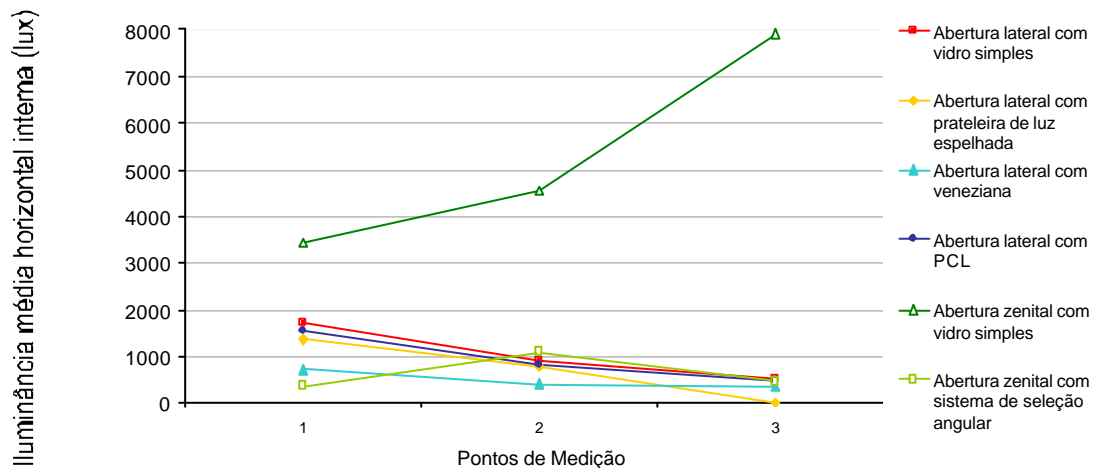
Também continuaram sendo detectadas duas situações onde ocorreram um aumento do índice de diversidade. Ambos os casos foram proporcionados pela abertura zenital com sistema de seleção angular. O aumento do índice de uniformidade foi de 10% no período das 9 às 10 h e de 52% no período das 15 às 14 h.

A partir das figuras 132 e 133 e das tabelas 18, 19 e 20, percebe-se que os sistemas que controlam a radiação solar em cada sistema, não só reduzem os níveis de iluminância, mas também interferem de forma significativa na distribuição de luz no ambiente interno. No entanto, cada sistema tem a sua geometria peculiar, ou seja, controla a radiação direta e ilumina os ambientes internos de forma diferenciada.

Diante dessa diversificação, apenas índices não são suficientes para a caracterização da iluminação natural interna. Faz-se necessária uma análise mais detalhada, onde deve ser ilustrada a distribuição de luz de cada sistema diante da variação da iluminância externa e da radiação solar direta.

#### 4.2.1.3 COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS FRENTE À VARIAÇÃO DA ILUMINÂNCIA EXTERNA E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

Os gráficos das figuras 134, 135, 136 e 137 mostram a distribuição de luz proporcionada por cada sistema diante da variação da iluminância externa e da radiação solar direta. Nesses gráficos, foram traçados os valores de iluminância horizontal (correspondente à média dos três dias de medição), para cada ponto e cada período de medição. O gráfico da figura 134 corresponde ao período das 9 às 10 h; da 134, ao período das 11 às 12 h; da 135, ao período das 13 às 14 h e da 136, ao período das 15 às 16 h.

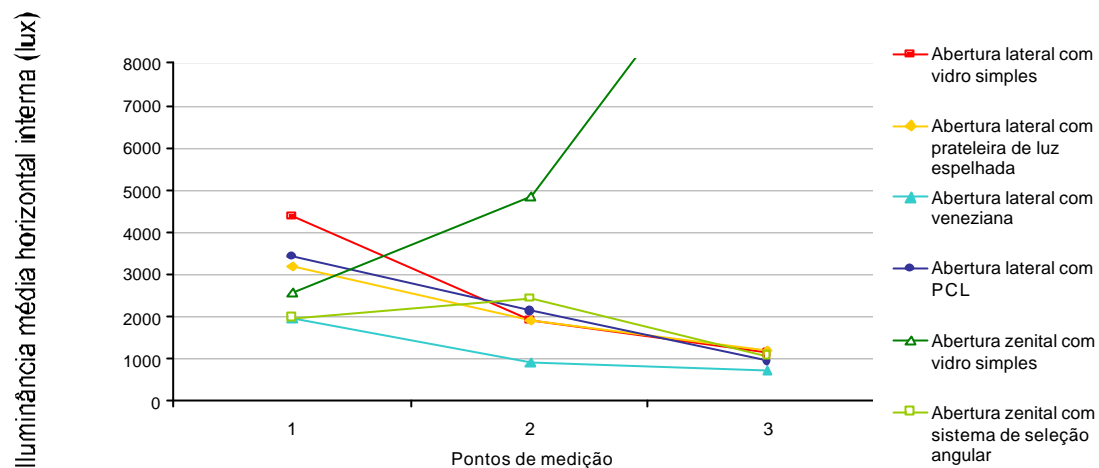


**FIGURA 134-** Distribuição da luz, nos modelos em escala. Medições realizadas das 9 às 10 h, sob condição de céu claro.

**TABELA 21 –** Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 134.

9 às 10 h	Iluminância interna (lux)						Iluminância externa (lux)
Pontos de medição	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular	Iluminância horizontal externa
1	1697.52	1353.98	714.17	1531.69	3430.45	354.99	88514.75
2	890.55	776.24	397.68	798.71	4543.00	1090.00	88514.75
3	527.19	432.46	327.63	480.25	7911.35	442.56	88514.75

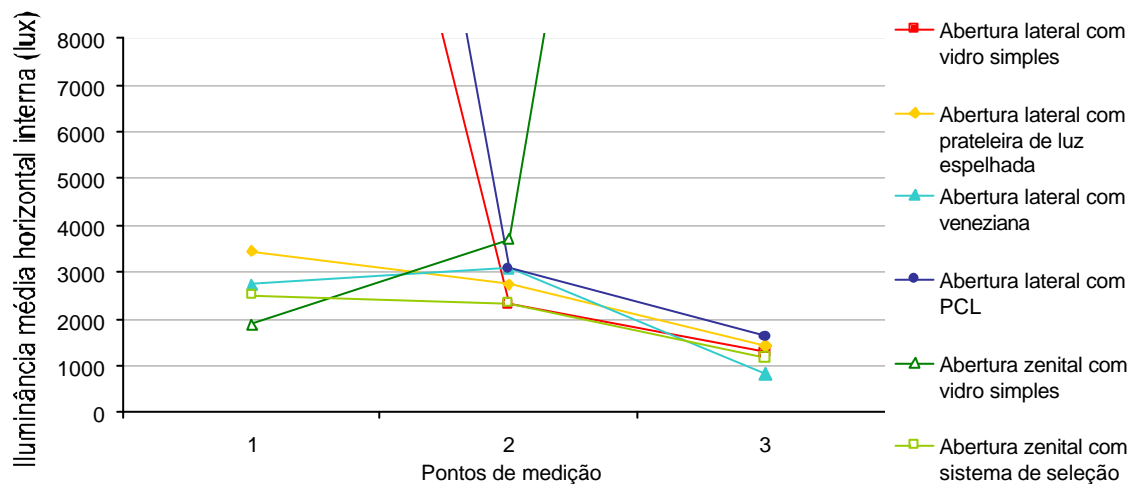




**FIGURA 135-** Distribuição da luz, nos modelos em escala. Medições realizadas das 11 às 12 h, sob condição de céu claro.

**TABELA 22 –** Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 135.

11 às 12 h	Iluminância interna (lux)						Iluminância externa (lux)
Pontos das medições	Abertura lateral com vidro simples	Prateleira de luz espelhada	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular	Iluminância horizontal externa
1	4381.794	3199.00	1946.89	3443.36	2585.8	1986.193	112641
2	1937.717	1931.95	916.51	2143.67	4861.167	2440.167	112641
3	1145.552	1221.00	751.69	945.77	12288.5	1089.763	112641



**FIGURA 136-** Distribuição da luz, nos modelos em escala. Medições realizadas das 13 às 14 h, sob condição de céu claro.

**TABELA 23 –** Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 136.

13 às 14 h	Iluminância interna (lux)						Iluminância externa (lux)
Pontos das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz espelhada	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular	Iluminância horizontal externa
1	24538.14	3443.56	2578.87	33370.65	1891.633	2502.733	115048
2	2317.734	2743.79	1358.03	3069.48	3687.067	2326.267	115048
3	1269.412	1428.32	837.48	1609.91	35948.53	1157.783	115048

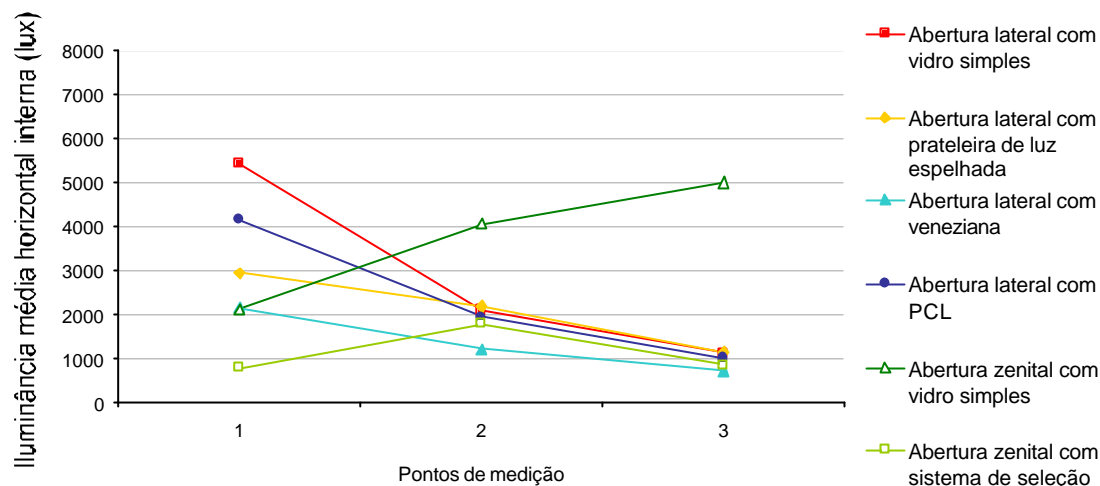


FIGURA 137- Distribuição da luz, nos modelos em escala Medições realizadas das 15 às 16 h, sob condição de céu claro.

TABELA 24 – Valores utilizados para a elaboração do gráfico da figura 137.

15 às 16 h	Iluminância interna (lux)						Iluminância externa (Lux)
	Pontos das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
1		5433.61	2948.74	2141.85	4149.53	2131.87	774.11
2		2106.01	2190.98	1210.85	1941.79	4058.13	1798.05
3		1133.51	1157.05	733.84	992.55	5003.67	843.57

Analizando as figuras 134, 135, 136 e 137, percebe-se qual dos sistemas admite a entrada de mais ou menos luz em cada ponto de medição.

A abertura lateral com vidro simples é o sistema que admite a entrada de mais luz no ponto 1 e a abertura zenital com vidro simples nos pontos 2 e 3. E o sistema de abertura zenital com seleção angular é o sistema que admite a entrada de menos luz no ponto 1 e a abertura lateral com veneziana nos pontos 2 e 3.

Neste experimento, a iluminância horizontal externa variou 34% durante os períodos de medição. A variação de iluminância interna proporcionada por cada sistema foi bem maior do que a variação externa como indica a tabela 25.

TABELA 25 – Variação do nível de iluminância interna proporcionado por cada sistema durante o dia.

Variação do nível de iluminância (%)						
Local da variação	Abertura lateral com vidro simples	Prateleira de luz espelhada	Veneziana	Painel cortado a laser (PCL)	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
Ponto 1	93%	61%	72%	95%	45%	86%
Ponto 2	61%	72%	71%	74%	24%	53%
Ponto 3	58%	61%	61%	70%	62%	62%
Ambiente	90%	63%	71%	93%	73%	69%

A maior variação de iluminância interna foi de 93%, proporcionada pela abertura lateral com PCL e menor de 69%, proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular.

Essas porcentagens comprovam que a variação da iluminância interna não é influenciada apenas variação da iluminância externa, uma vez que a menor variação encontrada é aproximadamente duas vezes maior do que a variação externa.

De acordo com Beltrán (1997), é a disponibilidade de luz do sol vista através da abertura que determina a quantidade de luz transmitida para o espaço interno através de qualquer um dos sistemas de iluminação natural. O desempenho luminoso de cada sistema depende mais da disponibilidade do brilho do sol do que da particular localização e orientação das aberturas.

A incidência da radiação solar direta e a geometria peculiar de cada sistema interferem de forma significativa na distribuição e admissão de luz no ambiente interno, ou seja, cada sistema controla a radiação direta e ilumina os ambientes internos de forma diferenciada. Assim faz-se necessária uma análise geométrica mais detalhada, onde deve ser ilustrado o funcionamento de cada sistema diante da incidência da radiação solar direta.

Inicialmente, procurou-se, definir o posicionamento do sol no dia e horários de medição. Para isso, foram definidos: a altura solar (ângulo formado pelo sol e pelo plano horizontal no qual se encontra o observador) e o azimute (ângulo formado pela projeção horizontal da direção dos raios solares com o Norte geográfico), visto que esses são os ângulos necessários para gerar as coordenadas que localizam qualquer posição do sol na abóbada celeste.

A tabela indica a altura solar e o azimute do sol, nos horários da medição do dia 11/10/2001, nos quatro horários de medição.

**TABELA 26** – Altura solar e azimute nos horários das medições luminosas.

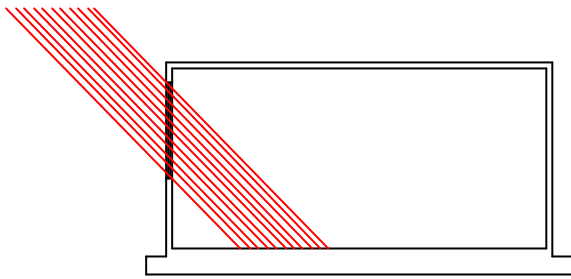
Horários de Medições	Azimute	Altura Solar
9 às 10 h	70° a 55°	40° a 52°
11 às 12 h	35° a 0°	62° a 67°
13 às 14	325° a 305°	62° a 52°
15 às 16 h	290° a 280°	40° a 32°

Objetivando analisar detalhadamente a iluminação natural proporcionada para cada modelo em escala, foi elaborada uma série de esquemas e gráficos, um para cada sistema, em cada horário de medição.

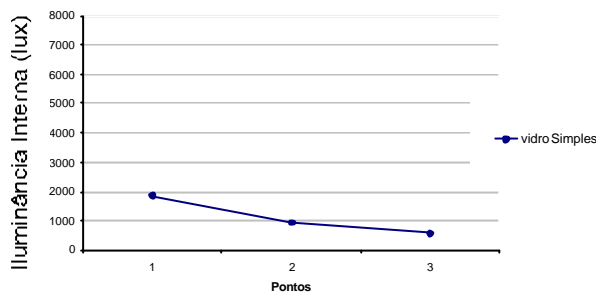
Os gráficos sintetizam e ilustram a transmitância e a distribuição da luz nos três pontos de medição sob diferentes ângulos de incidência da radiação solar. Os esquemas mostram a forma de controle da radiação solar, proporcionada por cada sistema de iluminação natural, em cada horário de medição.

#### ➤ **Abertura lateral com vidro simples**

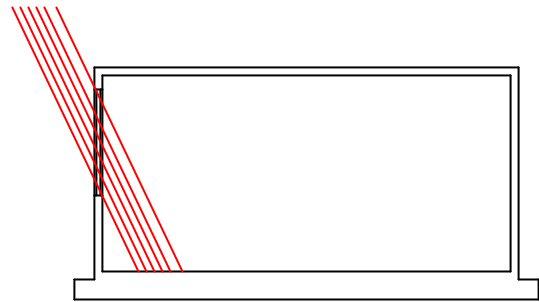
Identificadas as alturas solares, inicialmente, foram elaborados os esquemas das figuras 138, 139, 142 e 143, ilustrando a incidência da radiação solar direta na abertura lateral com vidro simples, nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 140, 141, 144 e 145 ilustram os níveis de iluminância interna, nos três pontos de medição, proporcionados por esse mesmo sistema.



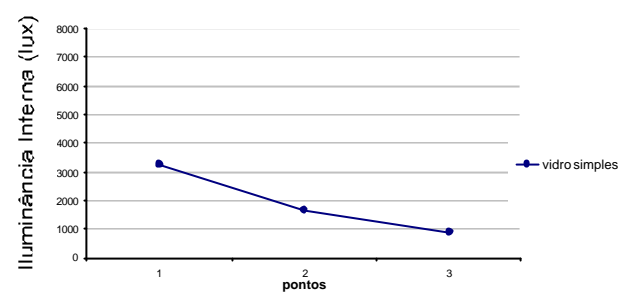
**FIGURA 138** – Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.



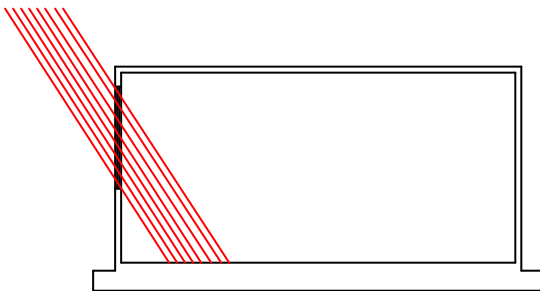
**FIGURA 140** – Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 9 às 10 h, céu claro.



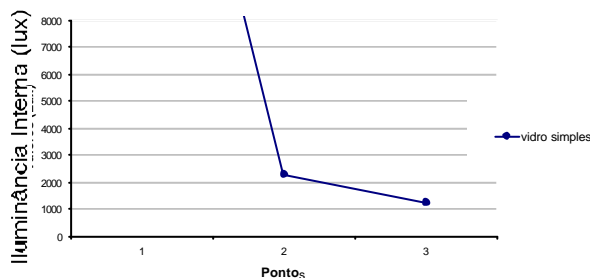
**FIGURA 139** – Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.



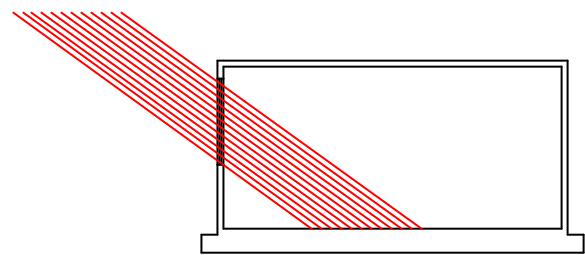
**FIGURA 141** – Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 11 às 12 h, céu claro.



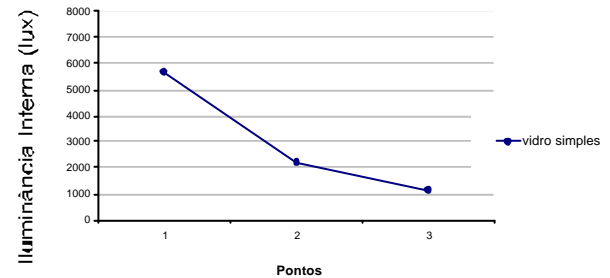
**FIGURA 142** – Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



**FIGURA 144** – Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 143** – Abertura lateral com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.



**FIGURA 145** – Distribuição da luz proporcionada pela abertura lateral com vidro simples - 15 às 16 h, céu claro.

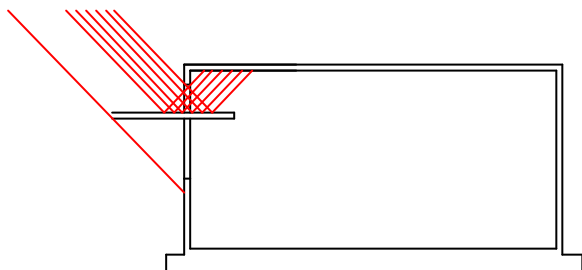
No caso de ambientes iluminados lateralmente, o nível de iluminância interna diminui com o aumento da distância da janela, devido à direção predominante da luz solar, resultando em uma iluminação não uniforme.

Como esperado, os gráficos das figuras 140, 141, 144 e 145 confirmam a má distribuição da luz proporcionada pelo sistema de abertura lateral com vidro simples. Os esquemas das figuras 138, 139, 142 e 143 mostram que o vidro simples admite a entrada da radiação solar direta e mantém a

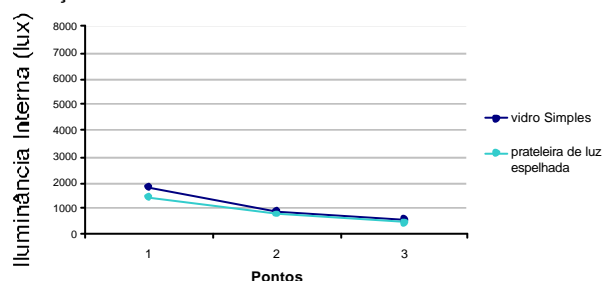
integridade direcional da luz, ocasionando excesso de luminosidade nas áreas próximas da abertura, em todos os períodos de medição.

### ➤ Abertura lateral com prateleira de luz espelhada

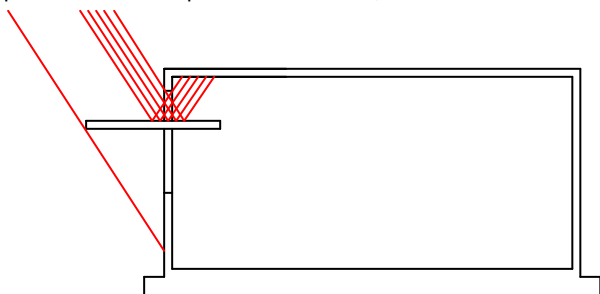
Os esquemas das figuras 146, 147, 150 e 151 ilustram o funcionamento da abertura lateral com prateleira de luz espelhada, diante da incidência da radiação solar nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 148, 149, 152 e 153 mostram os níveis de iluminância interna, nos três pontos de medição, proporcionados por esse sistema. Foram incluídos nestes gráficos, os níveis de iluminância interna, proporcionados pela abertura lateral com vidro simples, para servir de parâmetro de comparação entre os sistemas.



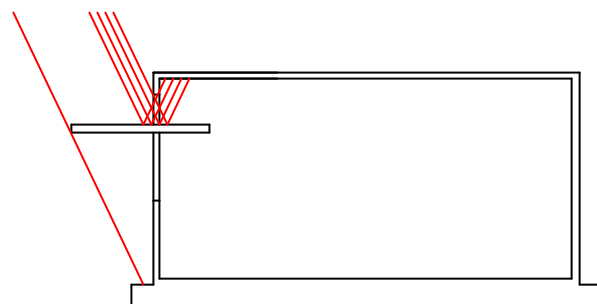
**FIGURA 146**– Prateleira de luz, diante da incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.



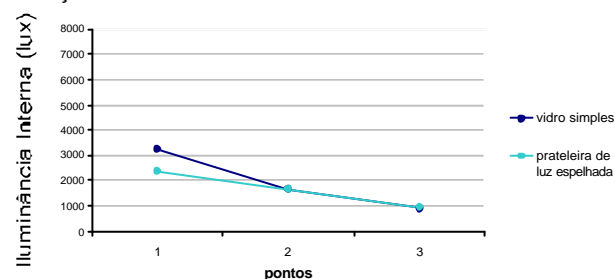
**FIGURA 148** – Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada - 9 às 10 h, céu claro.



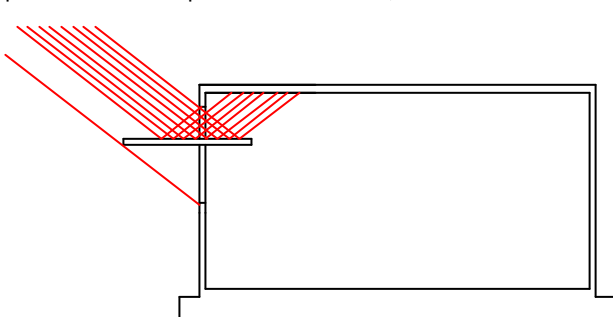
**FIGURA 150** – Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



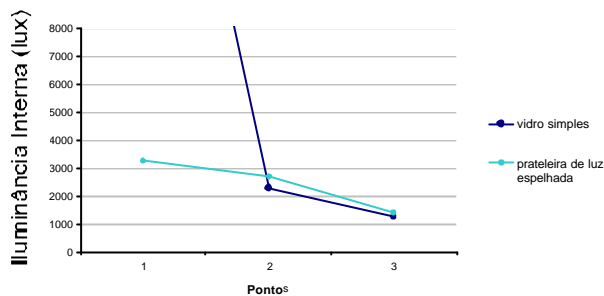
**FIGURA 147** – Prateleira de luz, diante da incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.



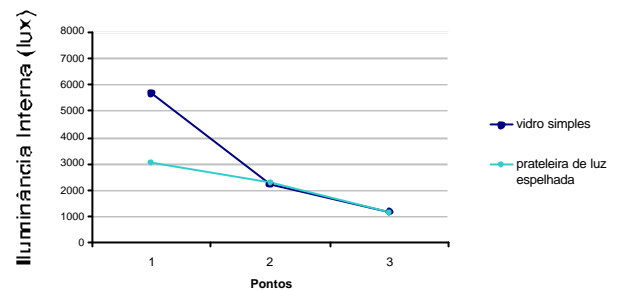
**FIGURA 149**– Distribuição da luz, proporcionada pela prateleira de luz espelhada - 11 às 12 h, céu claro.



**FIGURA 151** – Prateleira de luz - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.



**FIGURA 152**– Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 153**– Distribuição da luz proporcionada pela prateleira de luz espelhada. - 15 às 16 h, céu claro.

A prateleira de luz espelhada tem como elemento principal um componente de controle, posicionado horizontalmente e localizado acima da linha de visão, que divide a abertura lateral em duas porções: superior (iluminação) e inferior (visão e ventilação).

Os esquemas das figuras 146, 147, 150 e 151 mostram que esse componente intercepta toda a radiação solar direta e a redirecionado, de forma especular, para o teto. Nesses modelos em escala, o teto é uma fonte de iluminação secundária, difusa e voltada para a horizontal.

Os gráficos das figuras 148, 149, 152 e 153 comprovam que, nesse caso, o controle da radiação solar direta reduz o nível médio de iluminância no ambiente e melhora significativamente a distribuição da luz durante todo o dia, evitando problemas causados pelo excesso de luminosidade próxima a abertura.

Como foi visto no item 4.1.1.1, esse sistema propicia as suas maiores reduções de iluminância nos períodos das 11 às 12 h e das 13 às 14 h, justamente nas maiores elevações da altura solar.

Ao analisarmos as iluminâncias encontradas em cada ponto de medição, percebe-se que, nos períodos das 9 às 10 h, 11 às 12 h, e 15 às 16 h, o sistema mantém praticamente os mesmos valores de iluminância, proporcionados pelo vidro simples, nos pontos 2 e 3 e reduz, de forma significativa, a iluminância no ponto 1, local onde o vidro simples proporciona excesso de luminosidade. Nesses períodos, devido ao sombreamento da luz no ponto 1, o sistema diminui cerca de 1% a 46% o índice de uniformidade no ambiente (ver tabela 18).

Já no período das 13 às 14 h, além de reduzir o nível de iluminância no ponto 1, o sistema, devido ao redirecionamento da luz, proporciona mais luz nos pontos 2 e 3, do que o vidro simples. Nesse período, o sombreamento no ponto 1 e o redirecionamento da luz para os pontos 2 e 3 proporcionam a redução do índice de uniformidade aproximadamente em 89% (ver tabela 18).

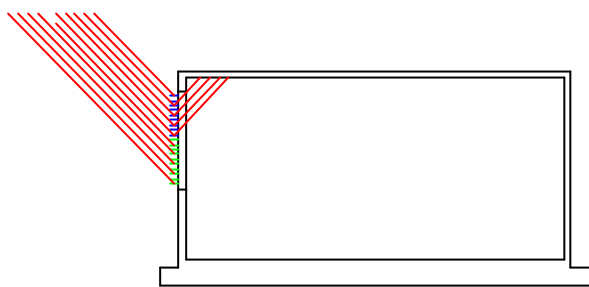
Fica evidente que, neste experimento, além de melhorar a uniformidade da luz no ambiente, a prateleira de luz espelhada, sob determinados ângulos de incidência, é capaz de elevar os níveis de iluminância em áreas mais afastadas da abertura.

Dados experimentais em Aizlewood (1993) e Littlefair (1995), também comprovam que as prateleiras de luz melhoram a uniformidade de iluminâncias, devido à redução dos níveis de luz próximos à janela, cujas áreas ficam totalmente sombreadas da luz solar direta e a luz refletida da prateleira e do teto não elevam muito o nível de iluminância do ambiente. Esses autores também

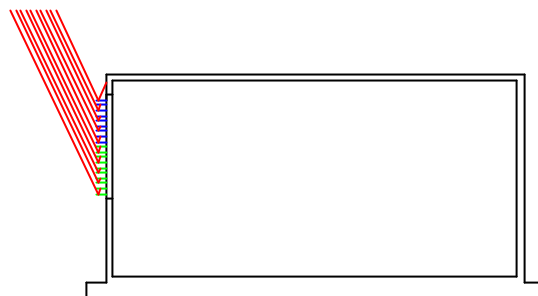
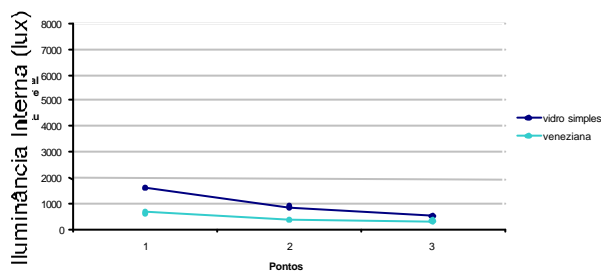
concordam que a prateleira de luz com reflexão especular melhora o seu desempenho com tetos mais altos, localizados a mais de três metros de altura.

#### ➤ Abertura lateral com veneziana

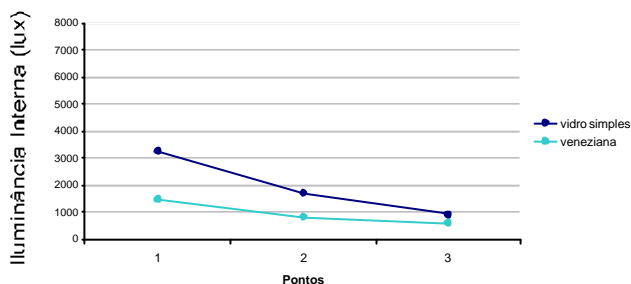
Os esquemas das figuras 154, 155, 158, 159 ilustram o funcionamento da abertura lateral com veneziana, diante da incidência da radiação solar nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 156, 157, 160 e 161 mostram os níveis de iluminância interna, proporcionados pelas aberturas laterais com veneziana e com vidro simples, em três pontos e nos quatro horários de medição.



**FIGURA 154** - Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.

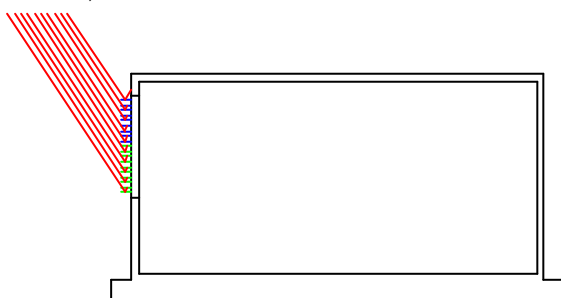


**FIGURA 155** - Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.

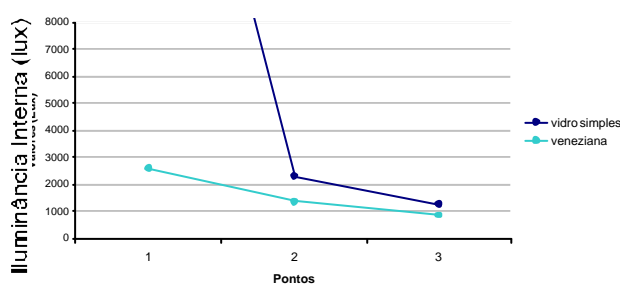


**FIGURA 156** - Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 9 às 10 h, céu claro.

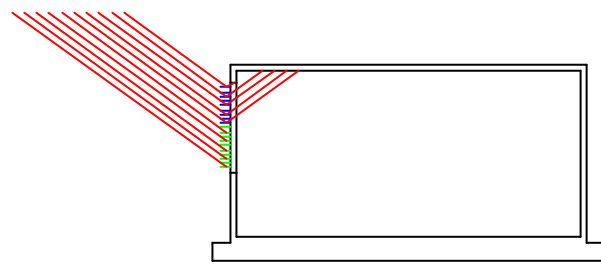
**FIGURA 157** - Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 11 às 12 h, céu claro.



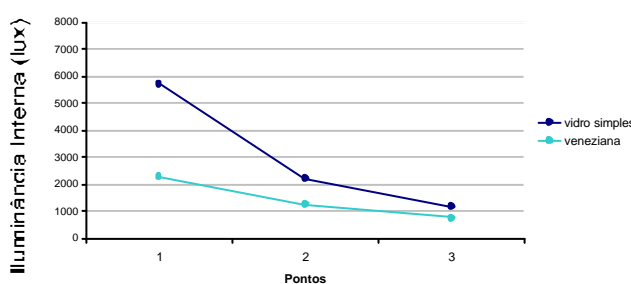
**FIGURA 158** - Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



**FIGURA 160** - Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 159** - Veneziana espelhada - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.



**FIGURA 161** - Distribuição da luz proporcionada pela veneziana - 15 às 16 h, céu claro.

A veneziana é composta por uma série de lâminas paralelas, externas e fixas, que cobrem toda a abertura lateral e realizam o controle da radiação solar direta. Nesse sistema, apenas as lâminas superiores possuem superfícies espelhadas (refletem a luz de forma especular); as outras lâminas possuem superfícies pintadas de branco (refletem a luz de forma difusa).

Os esquemas das figuras 154, 155, 158, 159 mostram que as lâminas interceptam toda a radiação solar direta, mas só as lâminas superiores redirecionam a luz direta para o teto. Analisando os gráficos das figuras 156, 157, 160 e 161 fica evidente que esse sistema reduz significativamente o nível médio de iluminância no ambiente e proporciona boa distribuição da luz, durante todo o dia.

De acordo com Aizlewood (1993), para melhorar a performance do sistema, seria interessante elevar a altura do teto para que a luz pudesse ser redirecionada mais para o fundo do ambiente.

Assim como a prateleira de luz (item 4.1.1.1), esse sistema propicia as suas maiores reduções nos períodos onde as alturas solares são mais elevadas, ou seja, das 11 às 12 h e das 13 às 14 h.

Ao analisarmos as iluminâncias encontradas em cada ponto de medição, pode-se perceber que a veneziana proporciona valores de iluminâncias menores do que os proporcionados pelo vidro simples, em todos os pontos, durante todo o dia.

A porcentagem de redução varia com a distância da janela, ou seja, quanto mais próxima da abertura, maior a redução do nível de iluminância com relação ao vidro simples. A redução no ponto 1 variou de 89% a 55%; no ponto 2, de 53% a 41% e, no ponto 3, de 38% a 34%.

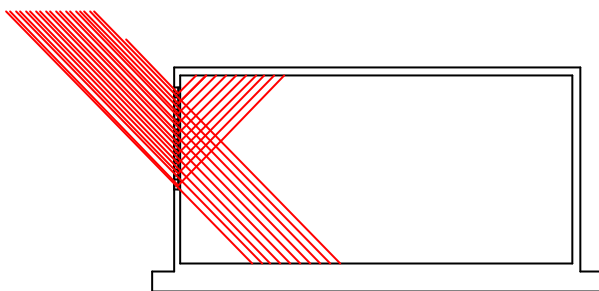
Por reduzir o nível de iluminância de forma proporcional ao distanciamento da abertura, nesse experimento, a veneziana diminuiu cerca de 34% a 85% o índice de uniformidade da iluminação do modelo em escala.

No entanto, a sua capacidade de redução do nível de iluminância pode gerar deficiência luminosa, principalmente, em pontos mais afastados da abertura. Assim, aconselha-se o seu uso em locais com abundância de luminosidade externa, uma vez que o sistema se mostrou capaz de controlar a radiação solar, de forma a redirecioná-la e introduzi-la em pequena quantidade, suficiente para a iluminação.

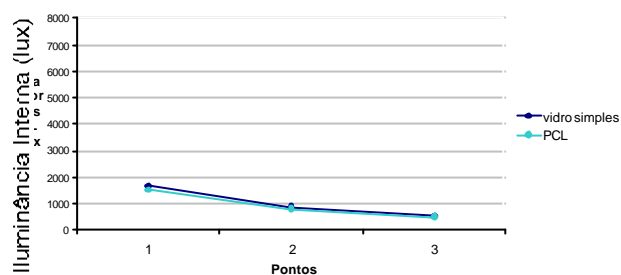
#### ➤ **Abertura lateral com painel cortado a laser**

Os esquemas das figuras 162, 163, 166, 167 ilustram o funcionamento da abertura lateral com painel cortado a laser diante da incidência da radiação solar nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 164, 165, 168 e 169 mostram os níveis de iluminância interna, proporcionado pelas aberturas laterais com PCL e com vidro simples, em três pontos e nos quatro horários de medição.

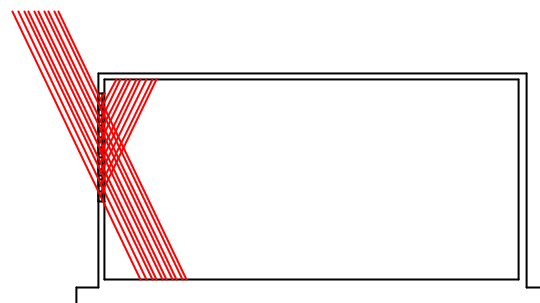




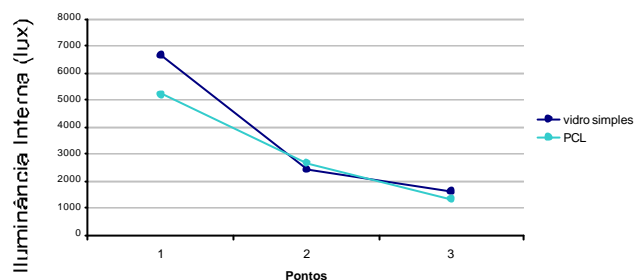
**FIGURA 162** – PCL - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.



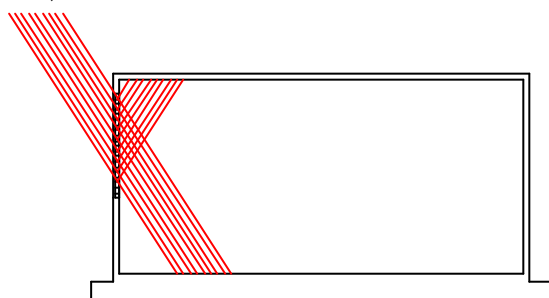
**FIGURA 164** – Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 9 às 10 h, céu claro.



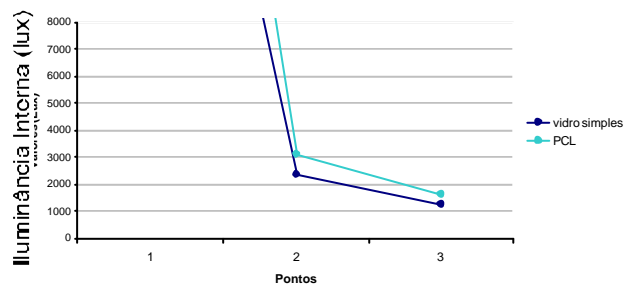
**FIGURA 163** – PCL - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.



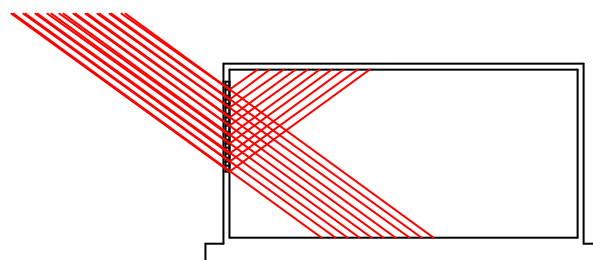
**FIGURA 165** – Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 11 às 12 h, céu claro.



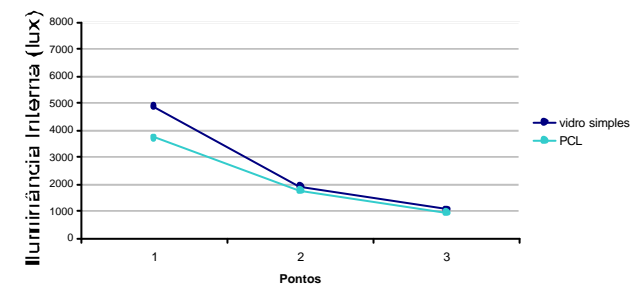
**FIGURA 166** – PCL - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



**FIGURA 168** – Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 167** – PCL - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.

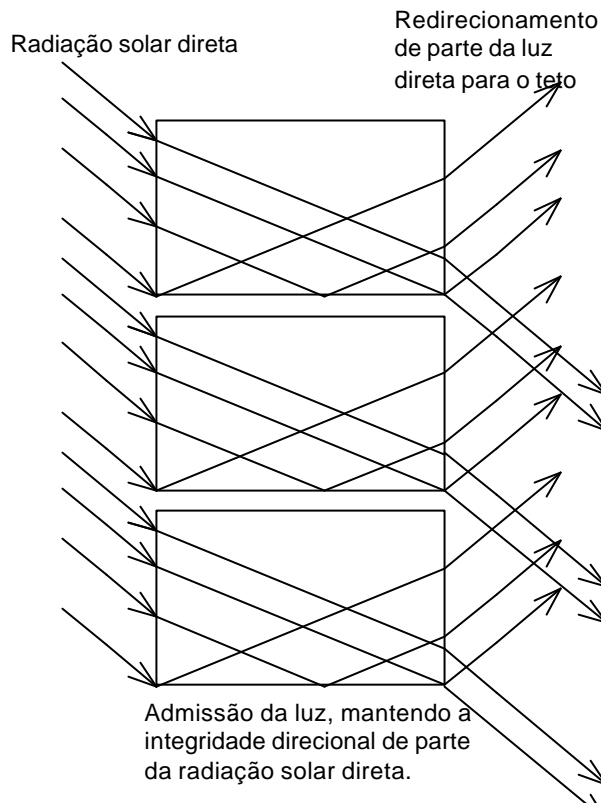


**FIGURA 169** – Distribuição da luz proporcionada pelo PCL - 15 às 16 h, céu claro.

O PCL cobre toda a extensão da abertura lateral e, dependendo do ângulo de incidência, pode controlar a luz solar direta a partir de dois fenômenos:

- refração - a direção do fecho de luz é alterada durante sua trajetória através do material;
- reflexão - os cortes realizados a laser no painel de acrílico produzem superfícies internas altamente reflexivas, capazes de redirecionar a luz direta de forma especular.

Ignorando as perdas por reflexão, ou seja, considerando que toda a radiação direta incidente na abertura é transmitida para o ambiente, pode-se perceber, na figura 170 que parte desta energia solar sofre apenas refração e penetra no ambiente, mantendo praticamente a sua integridade direcional (de cima para baixo); já a outra parte da luz direta, além da refração, também sofre reflexão e é redirecionada para o teto do ambiente, de onde vai ganhar qualidade difusa antes de iluminar o ambiente interno.



**FIGURA 170-** Redirecionamento da radiação solar, proporcionado pelo PCL. Fonte: Edmons, 1996.

Os esquemas das figuras 162, 163, 166, 167 mostram que o PCL não exclui a radiação solar direta no plano de trabalho e, ao analisarmos as iluminâncias encontradas em cada ponto de medição, por meio dos gráficos 164, 165, 168 e 169 pode se perceber que, por esse motivo, o sistema não reduz de forma demasiada o nível médio de iluminância interna.

Nos períodos de maiores elevações da altura solar, quando a veneziana e a prateleira de luz proporcionam as suas maiores reduções, o PCL chega até a levar em 35.3% o nível de iluminância interna.

No período das 9 às 10 h, o sistema mantém praticamente os mesmos valores de iluminância, proporcionados pelo vidro simples, nos pontos 1, 2 e 3.

Nos períodos das 11 às 12 h e das 15 às 16 h, o sistema mantém praticamente os mesmos valores de iluminância, proporcionados pelo vidro simples, nos pontos 2 e 3 e reduz cerca de 22% do nível de iluminância no ponto 1. O sombreamento da luz no ponto 1 melhora em torno de 5% a 17% o índice de uniformidade no ambiente (ver gráfico 18).

Já no período das 13 às 14 h, o sistema eleva o nível de iluminância em todos os pontos de medição: 21% o ponto 1, 24.49% o ponto 2 e 26% o ponto 3. Além do excesso de luminosidade,

proporcionado principalmente no ponto 1, o sistema aumenta em cerca de 7% o índice de uniformidade no ambiente (ver gráfico 18).

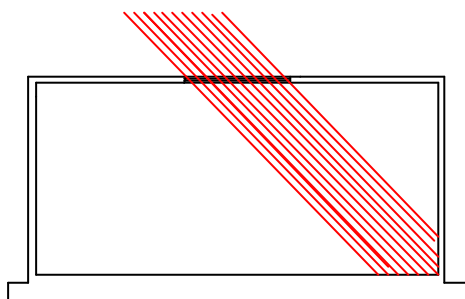
O desempenho do sistema muda significativamente de acordo com o ângulo de incidência da radiação solar. Na maior parte do dia, diminui, ainda que pouco, o nível de iluminância horizontal e o índice de uniformidade da luz no ambiente. No entanto, sob determinados ângulos de incidência, é capaz funcionar de forma contrária, elevando o nível de iluminância e o índice de uniformidade.

Dos sistemas analisados, é o único que provocou um grande melhoramento do nível de iluminância no fundo da sala; no entanto, apenas no período das 13 h às 14 h, quando o azimute variava de  $35^\circ$  a  $55^\circ$  e altura solar de  $62^\circ$  a  $52^\circ$ .

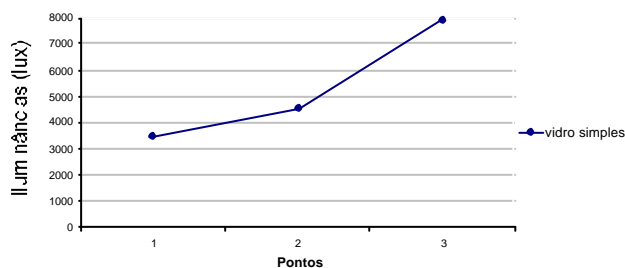
Acredita-se que uma boa possibilidade de utilização desse painel seria na parte superior das aberturas onde, provavelmente, o sistema poderia realizar um controle mais efetivo da transmissão da luz solar, evitando a incidência da luz direta no nível dos olhos dos usuários.

### ➤ Abertura zenital com vidro simples

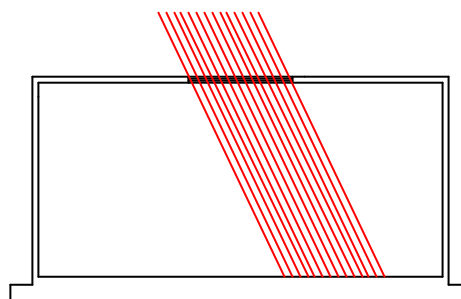
Os esquemas das figuras 171, 172, 175 e 176, ilustram o funcionamento da abertura zenital com vidro simples diante da incidência da radiação solar nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 173, 174, 177 e 178, mostram os níveis de iluminância interno, proporcionado por este sistema, em três pontos e nos quatro horários de medição.



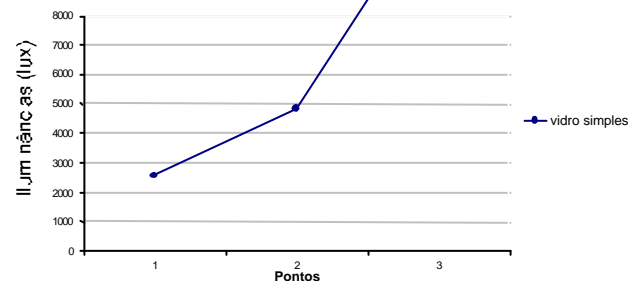
**FIGURA 171** – Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.



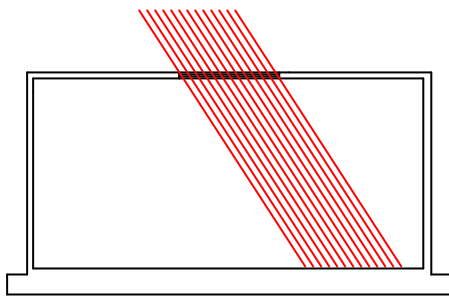
**FIGURA 173** – Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 9 às 10 h, céu claro.



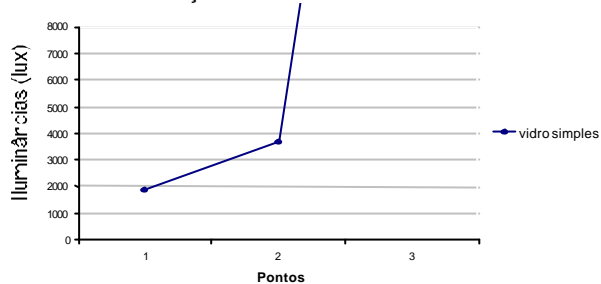
**FIGURA 172** – Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.



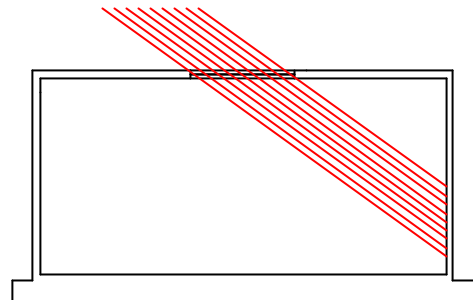
**FIGURA 174** – Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 11 às 12 h, céu claro.



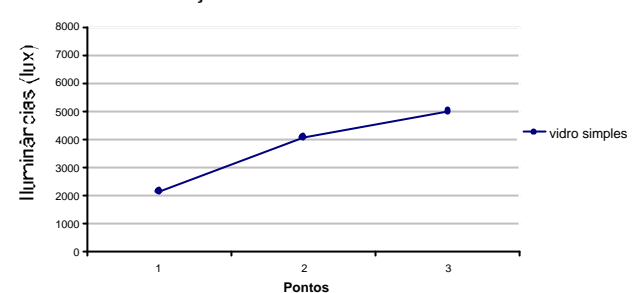
**FIGURA 175** – Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



**FIGURA 177** – Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 176** – Sistema de abertura zenital com vidro simples - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.



**FIGURA 178** – Distribuição da luz proporcionada pelo sistema zenital com vidro simples - 15 às 16 h, céu claro.

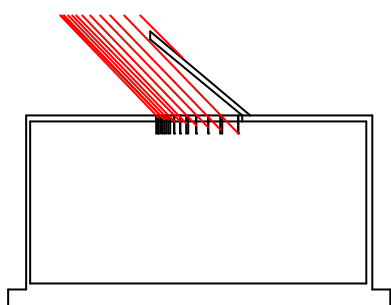
A grande vantagem dos ambientes iluminados por aberturas zenitais é que a luz coletada do céu tem o objetivo de iluminar uma área diretamente abaixo da abertura. No entanto, capta excesso de luz, difusa e direta, principalmente proveniente de alturas solares mais elevadas.

Como esperado, os gráficos das figuras 173, 174, 177 e 178 confirmam a má distribuição da luz no ambiente e os esquemas das figuras 171, 172, 175 e 176, mostram que o sistema não obstrui a entrada da radiação solar direta e mantém integridade direcional da luz, assim como a abertura lateral com vidro simples.

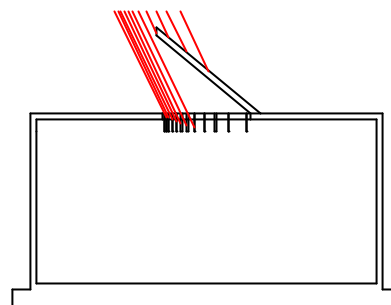
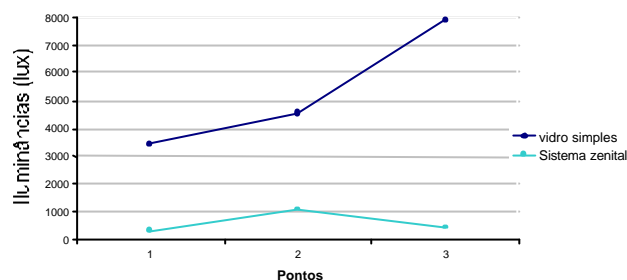
Na maior parte do dia, a radiação incide diretamente no plano de trabalho, o que pode gerar, entre outros problemas, desconforto visual por ofuscamento.

### ➤ Abertura zenital com sistema de seleção angular

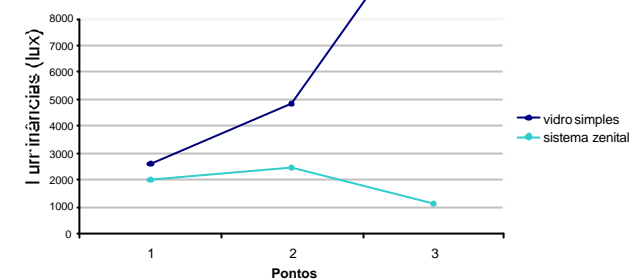
Os esquemas das figuras 179, 180, 183 e 184 ilustram o funcionamento da abertura zenital com sistema de seleção angular, diante da incidência da radiação solar nos quatro períodos de medição. Os gráficos das figuras 181, 182, 185 e 186 mostram os níveis de iluminância interna, proporcionado pelas da abertura zenital com vidro simples e com sistema de seleção angular, em três pontos e nos quatro horários de medição.



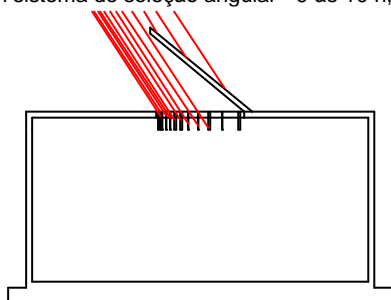
**FIGURA 179** – Abertura zenital com sistema de seleção angular - incidência da radiação solar direta - 9 às 10 h.



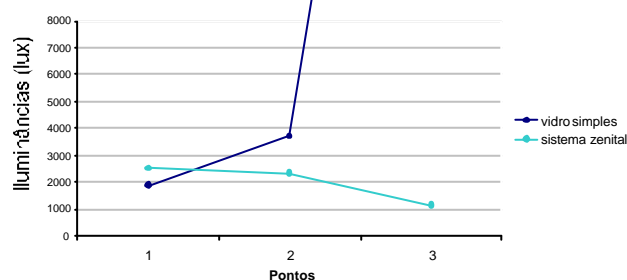
**FIGURA 180** – Abertura zenital com sistema de seleção angular - incidência da radiação solar direta - 11 às 12 h.



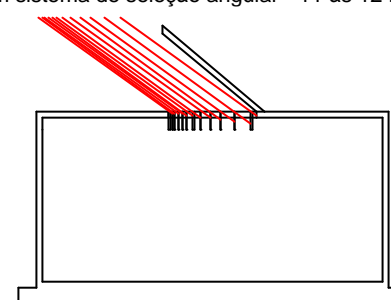
**FIGURA 181**– Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular - 9 às 10 h, céu claro.



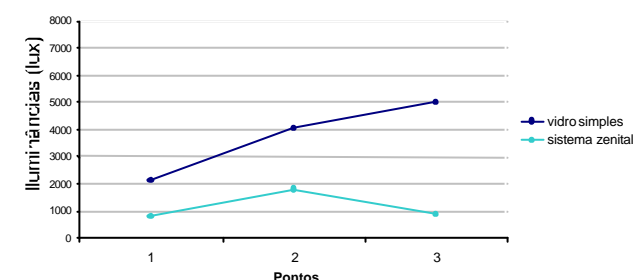
**FIGURA 183** – Abertura zenital com sistema de seleção angular - incidência da radiação solar direta - 13 às 14 h.



**FIGURA 185**– Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular - 13 às 14 h, céu claro.



**FIGURA 184** – Abertura zenital com sistema de seleção angular - incidência da radiação solar direta - 15 às 16 h.



**FIGURA 186**– Distribuição da luz proporcionada pela abertura zenital com sistema de seleção angular - 15 às 16 h, céu claro.

O sistema de seleção angular é composto por uma superfície inclinada, superior a um sistema de venezianas, que cobre toda a superfície da abertura zenital. Esse sistema proporciona iluminação zenital (superior) sem permitir a entrada da radiação solar direta.

Os esquemas das figuras 179, 180, 183 e 184 mostram que as lâminas da veneziana interceptam toda a radiação solar direta, de onde ganham qualidade difusa, antes de iluminarem o ambiente. Esse sistema distribui a luz de forma completamente diferente do sistema zenital com vidro simples.

Neste experimento, o ponto 2 é o que recebe mais luz durante a maior parte do dia (ver figuras 181, 182, 185 e 186). As lâminas da veneziana, que interceptam a radiação direta (caso não fosse obstruída, incidiria diretamente ou próxima ao ponto 3), passam a iluminar, de forma difusa, áreas logo abaixo da abertura (ponto 2).

Comparando o desempenho dos dois sistemas de abertura zenital analisados, deparamo-nos com situações contrárias: o sistema com vidro simples proporciona um dos maiores índices de uniformidade e valores de iluminância horizontal em todos os pontos de medição; já o sistema com seleção angular funciona de forma oposta e proporciona um dos menores índices de uniformidade e valores de iluminância horizontal em todos os pontos de medição.

Nesse caso, o sistema de seleção angular mostra que o sistema de abertura zenital, pouco indicado para locais com altos índices de luminosidade, por admitir grande quantidade de luz, quando bem projetada é capaz de controlar a radiação solar e introduzi-la de forma uniforme e em pequena quantidade, suficiente para a iluminação.

#### 4.2.2 PERFORMANCE TÉRMICA DOS SISTEMAS DE ABERTURA

Como já havia sido citado na Metodologia, foram realizadas medições do fluxo de calor transmitido por cada sistema de abertura, através o Radiômetro de Abertura, durante os seguintes horários: 9 às 10 h, 11 às 12 h, 13 às 14 h e 15 às 16 h.

Foram realizados 3 dias de medições sob condição de céu claro:

- 1º - Dia 05/11/2001;
- 2º - Dia 06/11/2001;
- 3º - Dia 7/11/2001.

As figuras a seguir indicam a altura solar e o azimuth do sol nos horários das medições no dia 5/11/2001.

**TABELA 27** – Altura solar e azimuth nos dias das medições térmicas.

Horários de Medições	Azimuth	Altura Solar
9 às 10 h	82° a 70°	40° a 57°
11 às 12 h	50° a 0°	70° a 85°
13 às 14	310° a 290°	70° a 57°
15 às 16 h	278° a 270°	40° a 30°

À medida que aconteceu a aquisição dos dados através dos transdutores, um piranômetro mediu a incidência de radiação solar direta na abertura em  $W/m^2$ , para a determinação do Fator de Solar (FS) do sistema de iluminação natural. Esses dados auxiliarão a análise do desempenho térmico dos sistemas em questão.

Inicialmente, foram elaborados gráficos para avaliar a variação dos resultados encontrados nos três dias de medição. Nos gráficos das figuras 187 (dia 05/11/2001), 188 (dia 06/11/2001) e 189 (dia 07/11/2001), foram traçados os valores de Fatores Solares dos sistemas analisados nos quatro períodos de medição.

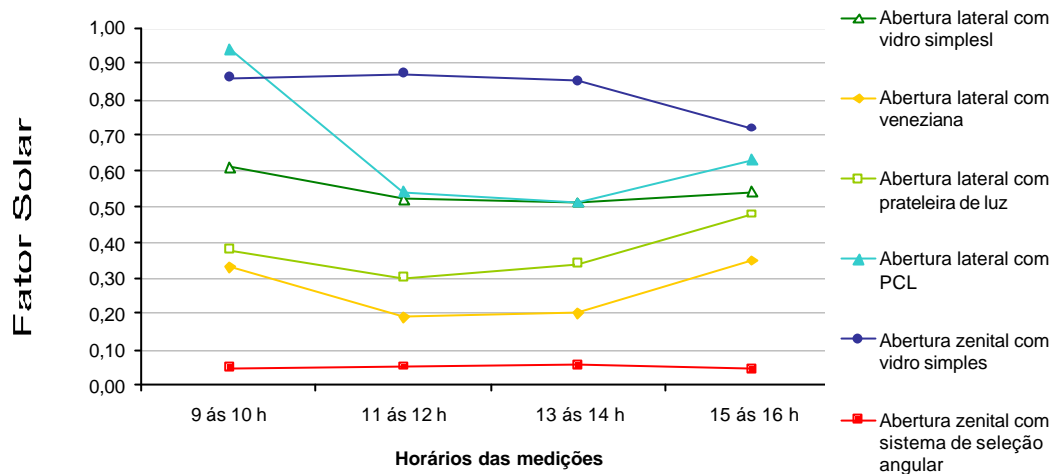


FIGURA 187- Fator Solar de cada sistema de iluminação natural , no dia 05/11/2001.

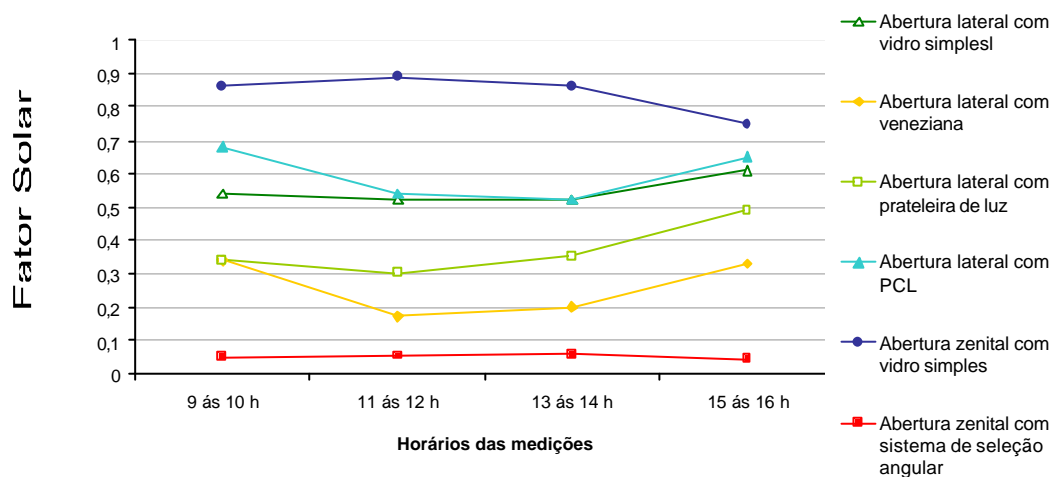
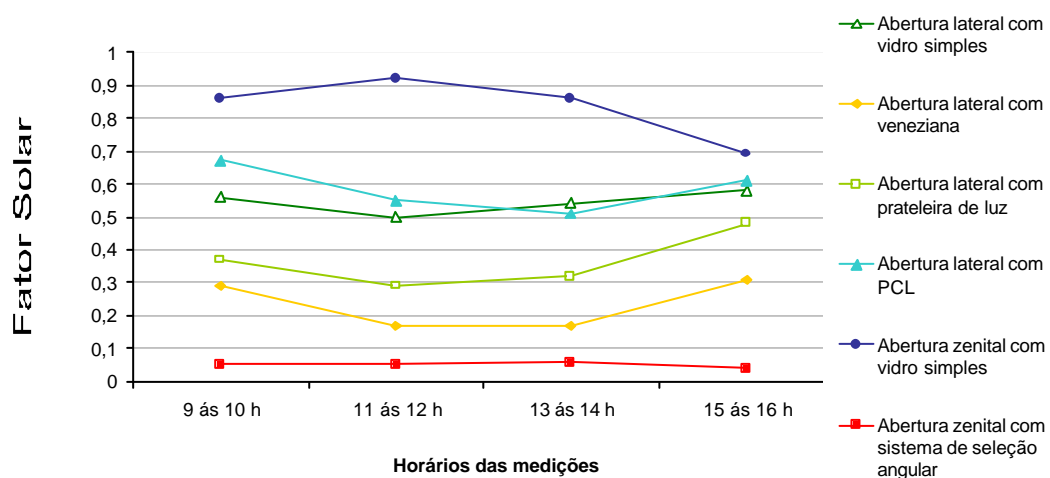


FIGURA 188- Fator Solar de cada sistema de iluminação natural , no dia 06/11/2001.



**FIGURA 189-** Fator Solar de cada sistema de iluminação natural, no dia 07/11/2001.

Analisando as figuras 187, 188 e 189, percebe-se a ocorrência de repetibilidade da maior parte dos resultados, com pequenas variações nos valores. Foi medida uma grande quantidade de valores com menos de 8% de variação, comparando dois dias de medições, como indica a tabela 28.

**TABELA 28** – Menores variações dos Fatores Solares encontrados em dois dias de medições (sublinhados).

<b>Fatores Solares</b>				
<b>Sistema de iluminação natural</b>	<b>Horários de medição</b>			
	9 às 10 h.	11 às 12 h.	13 às 14 h.	15 às 16 h.
Abertura lateral com vidro simples (05/11)	<u>0.53</u>	0.49	<u>0.52</u>	<u>0.55</u>
Abertura lateral com vidro simples (06/11)	<u>0.54</u>	<u>0.52</u>	<u>0.52</u>	0.61
Abertura lateral com vidro simples (07/11)	0.56	<u>0.5</u>	0.54	<u>0.58</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>1.85%</b>	<b>2.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>5.17%</b>
Prateleira de luz (05/11)	0.42	0.32	<u>0.36</u>	<u>0.49</u>
Prateleira de luz (06/11)	<u>0.34</u>	<u>0.30</u>	<u>0.35</u>	<u>0.49</u>
Prateleira de luz (07/11)	<u>0.37</u>	<u>0.29</u>	0.32	0.48
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>8.11%</b>	<b>6.25%</b>	<b>2.78%</b>	<b>0.00%</b>
Veneziana (05/11)	<u>0.36</u>	0.23	<u>0.22</u>	0.40
Veneziana (06/11)	<u>0.34</u>	<u>0.17</u>	<u>0.20</u>	<u>0.33</u>
Veneziana (07/11)	0.29	<u>0.17</u>	0.17	<u>0.31</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>5.56%</b>	<b>0.00%</b>	<b>8.33%</b>	<b>6.06%</b>
PCL (05/11)	<u>0.69</u>	0.53	<u>0.51</u>	<u>0.63</u>
PCL (06/11)	<u>0.68</u>	<u>0.54</u>	0.52	0.65
PCL (07/11)	0.67	<u>0.55</u>	<u>0.51</u>	<u>0.61</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>1.45%</b>	<b>1.85%</b>	<b>0.00%</b>	<b>3.08%</b>
Abertura zenital com vidro simples (05/11)	<u>0.86</u>	<u>0.88</u>	0.84	<u>0.75</u>
Abertura zenital com vidro simples (06/11)	<u>0.86</u>	<u>0.89</u>	<u>0.86</u>	<u>0.75</u>
Abertura zenital com vidro simples (07/11)	0.86	0.92	<u>0.86</u>	0.69
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>0.00%</b>	<b>1.12%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>
Abertura zenital com sistema de seleção angular (05/11)	0.060	0.057	0.060	0.050
Abertura zenital com sistema de seleção angular (06/11)	<u>0.051</u>	<u>0.053</u>	<u>0.057</u>	<u>0.044</u>
Abertura zenital com sistema de seleção angular (07/11)	<u>0.050</u>	<u>0.051</u>	<u>0.056</u>	<u>0.040</u>
<b>Diferença entre o maior e o menor valor (%)</b>	<b>1.96%</b>	<b>3.77%</b>	<b>1.75%</b>	<b>9.09%</b>

Assim como nas medições luminosas, esperava-se encontrar o mesmo valor de Fator Solar para os três dias de medição, visto que o Radiômetro de Abertura foi exposto às mesmas condições ambientais.

Podemos supor que as variações encontradas de um dia para o outro ocorreram devido à variação do ângulo de incidência da radiação solar direta - uma vez que as medições, apesar de realizadas em um mesmo intervalo de tempo (hora), não foram realizadas precisamente nos mesmos minutos e segundos.

Sabe-se que, para obter maior precisão dos dados, seriam necessários mais medições; no entanto, assim como os dados luminosos, acredita-se na validade dos dados térmicos encontrados nas medições, uma vez que se visa realizar apenas uma análise qualitativa comparativa entre os sistemas de iluminação e não uma análise quantitativa.

Para a análise térmica dos sistemas de iluminação natural, foram utilizadas as médias dos Fatores Solares como indicam a tabela 29 e a figura 190.

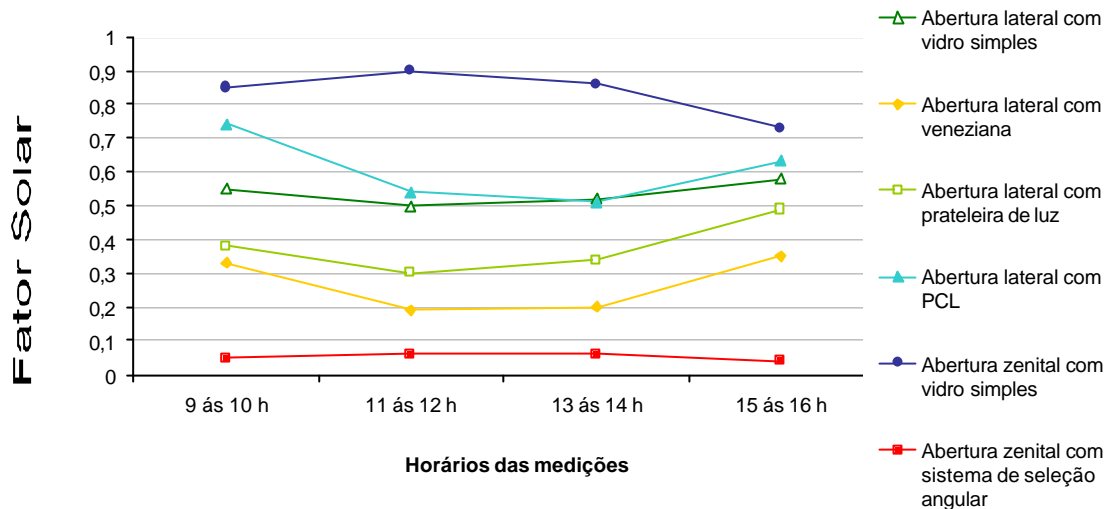
**TABELA 29** – Fatores Solares dos sistemas de iluminação natural nos quatro horários de medição.

<b>Fatores Solares dos sistema de iluminação natural analisados.</b>						
Horários das	Abertura	Abertura	Abertura	Abertura	Abertura	Abertura zenital

Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol



medições	lateral com vidro simples	lateral com prateleira de luz	lateral com veneziana	lateral com PCL	zenital com vidro simples	com sistema de seleção angular
9 às 10 h	0.55	0.38	0.33	0.74	0.85	0.05
11 às 12 h	0.50	0.30	0.19	0.54	0.90	0.06
13 às 14 h	0.52	0.34	0.20	0.51	0.86	0.06
15 às 16 h	0.58	0.49	0.35	0.63	0.73	0.04



**FIGURA 190-** O gráfico ilustra a média dos Fatores Solares dos sistemas analisados, dos três dias de medição.

De acordo com Pereira (1992), o Fator Solar não varia significativamente sob as diferentes condições de céu (claro e parcialmente encoberto), com exceção de condições de céu muito encoberto, mas é dependente do ângulo de incidência de radiação solar.

Para a verificação dessa afirmação, foram elaborados os gráficos das figuras 191 e 192. No gráfico da figura 191, foram traçados os Fatores Solares dos sistemas compostos por aberturas laterais e, no gráfico da figura 192, os Fatores Solares dos sistemas compostos por aberturas zenitais, diante dos ângulos de incidência solar vertical e horizontal, respectivamente, correspondente aos quatro horários de medição.

O ângulo de incidência horizontal ( $\beta$ ) corresponde:

$$b = \cos^{-1}(\sin g_o) \quad (6)$$

Onde:

$\gamma_o$  - Altura solar

O ângulo de incidência vertical ( $\beta$ ) corresponde:

$$b = \cos^{-1}(\cos g_o \cdot \cos D_a) \quad (7)$$

Onde:

$\gamma_0$  - Altura solar

$\Delta\alpha$  - Diferença azimutal entre o sol e a superfície.

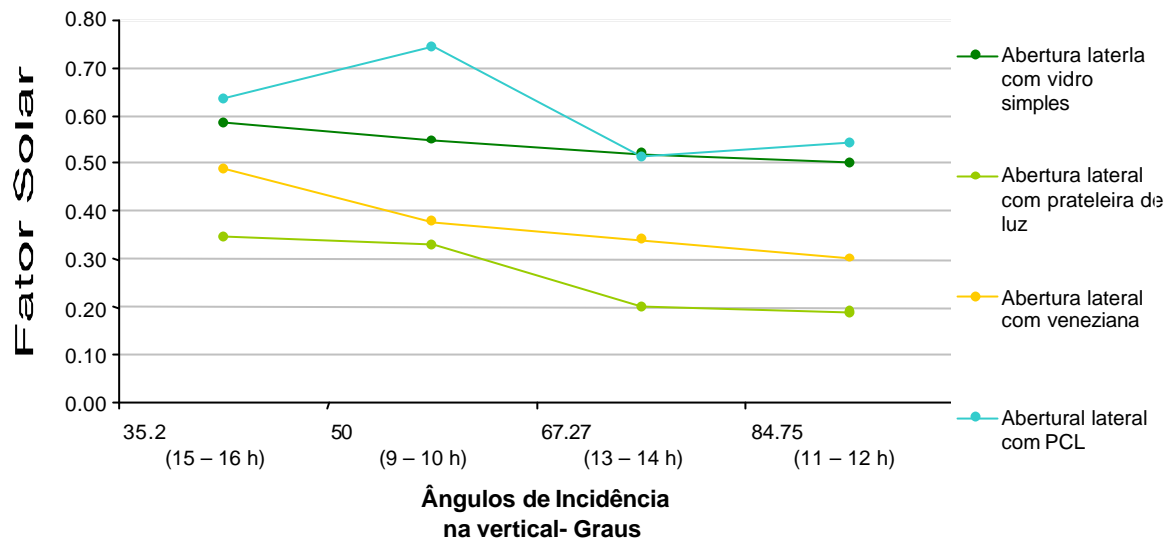


FIGURA 191–Fator Solar de acordo com os ângulos de incidência solar na vertical.

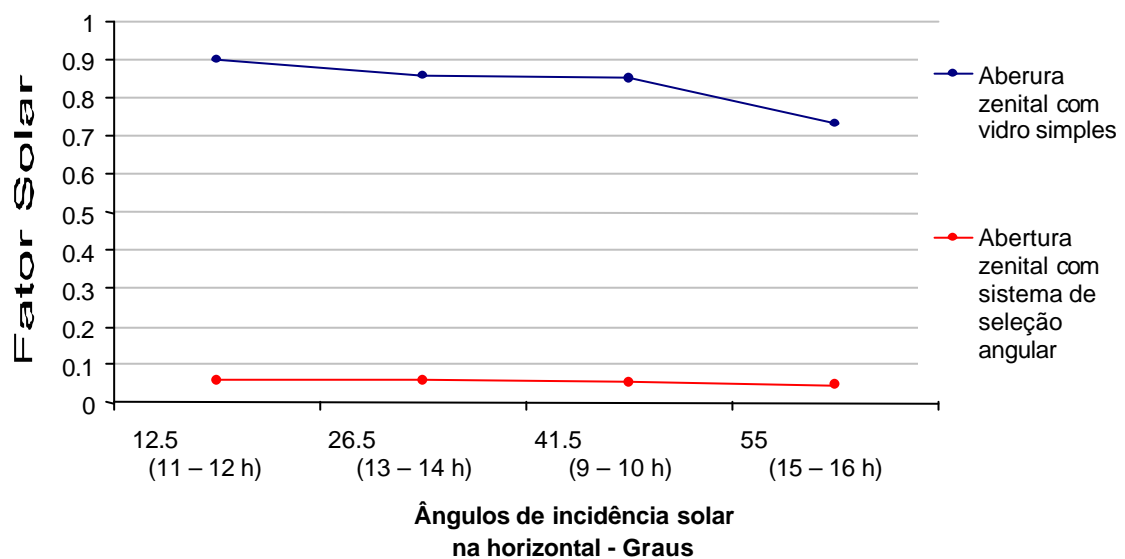


FIGURA 192– Fator Solar de acordo com os ângulos de incidência solar na horizontal.

Analisando as figuras 191 e 192, nota-se que os Fatores Solares dos sistemas das aberturas laterais com vidro simples, com prateleira de luz, com veneziana e a abertura zenital com vidro simples aumentam à medida que diminui o ângulo de incidência da radiação solar.

Ao meio dia, quando o sol está em frente à fachada Norte, é o período em que esses sistemas admitem a entrada de uma menor quantidade de calor, devido ao maior ângulo de incidência da radiação solar.

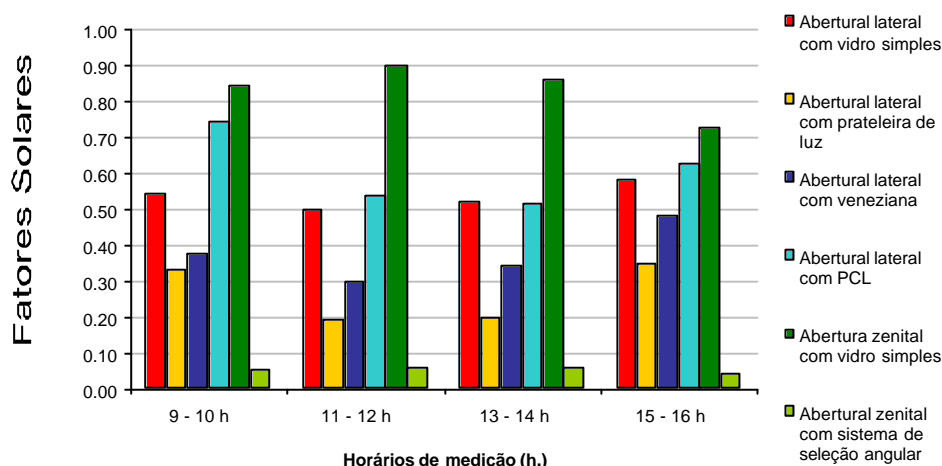
A abertura lateral com PCL e a abertura zenital com sistema de seleção angular tiveram comportamentos distintos dos demais sistemas. Os valores para o PCL oscilam diante do aumento do ângulo de incidência, enquanto os valores do sistema de seleção angular não sofrem grandes variações, durante o dia.

Acredita-se que a aparente falta de sensibilidade do desempenho térmico desses sistemas com relação ângulo de incidência da radiação solar, deve-se ao fato de que, além dos sistemas não terem sido submetidos a todos os ângulos de incidência, as características óticas e geométricas, dos mesmos, podem ter interferido de forma significativa, camuflando essa provável dependência do fator solar com relação ao ângulo de incidência.

Para facilitar a comparação do desempenho térmico de cada sistema, foi elaborado o gráfico da figura 193, onde foram traçados os Fatores Solares medidos em cada horário de medição.

Os sistemas que foram projetados para sombrear grande parte da radiação solar direta, ou seja, as aberturas laterais com veneziana, com prateleira de luz e a abertura zenital com sistema de seleção angular possuem os melhores resultados, com relação à redução do fluxo de calor para o ambiente.

A abertura zenital com vidro simples é o sistema que admite a maior entrada de calor no ambiente, por captar grande parte da luz proveniente de alturas solares mais elevadas.



**FIGURA 193**– O gráfico ilustra os Fatores Solares dos sistemas analisados, nos quatro horários de medição.

Curiosamente, a abertura zenital com sistema de seleção angular é o sistema que possui os menores Fatores Solares. Neste experimento, devido aos seus elementos de controle, o sistema admite apenas o acesso de menos de 6% do calor, que incide na abertura, para o ambiente interno.

Das aberturas laterais, o sistema que utiliza apenas o vidro simples e o PCL são os que possuem os maiores Fatores Solares, justamente por admitirem o acesso de boa parte da radiação solar direta incidente.

Considerando os sistemas de iluminação que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem, as aberturas laterais com prateleira de luz, veneziana e abertura zenital com sistema de

seleção angular reduzem o fluxo de calor para o ambiente. Já a abertura lateral com PCL é o único sistema que aumenta esse fluxo (ver tabela 30).

**TABELA 30**– Redução em porcentagem do Fator Solar das aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e com PCL com relação à abertura lateral com vidro simples e da abertura zenital com sistema de seleção angular com relação à abertura zenital com vidro simples.

<b>Redução em porcentagem do Fator Solar (%)</b>				
Horários de medições	Em relação ao sistema de abertura lateral com vidro simples			Em relação ao sistema de abertura zenital com vidro simples
	Veneziana	Prateleira de luz	PCL	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	39.53%	30.89%	-36.08%	93.69%
11 às 12 h	61.33%	39.82%	-8.23%	93.55%
13 às 14 h	61.54%	34.37%	1.20%	93.27%
15 às 16 h	40.73%	16.51%	-8.09%	93.88%

Comparando os sistemas analisados, percebe-se que as maiores reduções do nível de iluminância interna são proporcionados pela abertura zenital com sistema de seleção angular, que reduz o fluxo de calor em torno de 93% a 94%, devido a seus elementos de controle que impedem o acesso de toda a radiação solar incidente na abertura.

A Prateleira de luz e a veneziana proporcionam suas maiores reduções de fluxo de calor nos períodos das 11 às 12 h e das 13 às 14 h, justamente no período de pior insolação para a fachada Norte. O ocorrido deve-se ao fato de esses sistemas possuírem protetores solares horizontais, que são mais eficientes com alturas mais elevadas do sol.

O PCL reduz o nível de iluminância apenas no período das 13 às 14 h; nos outros períodos, devido às suas características óticas, o sistema possui Fatores Solares de 8% a 36% maior do que o do vidro simples.

#### 4.2.3 SÍNTESE FINAL E DIRETRIZES DE PROJETO

Os sistemas de abertura funcionam como filtro em edificações e a dosagem de luz e calor solar adequada a cada ambiente deve ser definida de acordo com a atividade que será desempenhada e com o clima do local onde a edificação está inserida.

Cada clima e atividade demandam condições térmicas e luminosas diferenciadas. Neste trabalho, os sistemas não foram projetados para iluminar uma atividade específica, mas deveriam funcionar adequadamente, caso fossem inseridos em locais de baixa latitude, como é o caso do Nordeste do Brasil. Essa região foi escolhida para representar os locais de baixa latitude, onde as aberturas devem ser capazes de lidar com o delicado e intenso conflito entre a luz e o calor.

O Nordeste, que possui clima quente e úmido, tem como principais estratégias bioclimáticas a ventilação natural e o controle da radiação solar. Nesse local, a luz do sol é muito forte e o nível de iluminação natural é alto, com ou sem nuvens, embora o céu possa parecer cinzento quando a nebulosidade é alta.

No entanto, para que o arquiteto possa escolher e projetar adequadamente os sistemas de iluminação natural, é necessário obter informações a respeito do desempenho térmico e luminoso de cada sistema.

Procurando estimar os impactos térmicos em conjunto com os benefícios luminosos proporcionados por cada sistema analisado foi calculado o SSLE\*. Trata-se de um índice baseado no “*Solar System Luminous Efficacy*” (SSLE), citado no item 2.5.3, definido como a proporção da luz natural utilizada no plano de trabalho com o total da energia solar radiante admitida no espaço, expresso por Lumen/Watt.

O índice calculado neste item foi denominado SSLE\*, uma vez que no experimento luminoso foi medido apenas a iluminância horizontal interna, em lux, de onde foi extraído o fluxo luminoso (Lumen), e não o fluxo luminoso propriamente dito. A tabela 31 mostra os valores de SSLE\* calculados para cada sistema de iluminação natural estudado.

Vale salientar que presença da radiação solar direta no sensor (fotocélula) e a utilização de sistemas inovativos de iluminação natural distorcem algumas informações, uma vez que este índice não leva em consideração a distribuição de luz no ambiente, ou seja, não considera que alguns sistemas de abertura, como sistemas de aberturas laterais e zenitais simples, por exemplo, distribuem a luz de forma irregular. Assim, foram retirados, da tabela 31, os valores do SSLE\* dos horários onde ocorreram a maior incidência da radiação solar direta no sensor.

**TABELA 31** – Valores do SSLE\* para cada sistema de iluminação natural estudado, retirando os horários onde ocorreram a maior incidência de radiação solar direta no sensor.

SSLE* lm/W						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	165,30	201,63	132,98	106,44	90,86	169,52
11 às 12 h	388,12	283,95	283,09	297,23	102,12	474,51
13 às 14 h	-	476,67	366,43	-	-	532,61
15 às 16 h	-	496,87	405,81	342,93	108,69	543,64
<b>Média</b>	276,71	364,78	297,08	248,87	100,56	430,07

Assim, de acordo com a tabela 31, segue, em ordem decrescente, a lista dos sistemas que apresentam uma maior eficiência luminosa:

- 1- Abertura zenital com sistema de seleção angular
- 2- Abertura lateral com prateleira de luz
- 3- Abertura lateral com veneziana
- 4- Abertura lateral com vidro simples
- 5- Abertura lateral com PCL
- 6- Abertura zenital com vidro simples

Visando ampliar a contribuição para as informações técnicas existentes, relevantes ao processo de projeto de sistemas de iluminação natural, foram elaboradas as tabelas 35, 36, 37, 38, 39 e 40, que mostram uma avaliação do desempenho térmico e luminoso para cada sistema de iluminação natural analisado, nos quatro períodos de medição e sob condições de céu claro e encoberto, de acordo com os conceitos e critérios expostos nas tabelas 32, 33 e 34.

**Tabela 32**– Critério de avaliação da iluminância média interna proporcionada por cada sistema de abertura analisado.

ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA		
Símbolos	Conceitos	Critérios
●	Muito bom	Valores entre 1000 e 2000 lux
■	Bom	Valores entre 300 e 1000 lux
▲	Ruim	Valores entre 100 e 300 lux e entre 2.000 e 3.000 lux
◆	Muito ruim	Valores abaixo de 100 lux e acima de 3000 lux

**Tabela 33** – Critério de avaliação da distribuição de luz natural proporcionada por cada sistema de abertura analisado.

DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL		
Símbolos	Conceitos	Critérios
●	Muito bom	Valores de índice de diversidade (Ilum. máx./ Ilum. mín.) menores que 2
■	Bom	Valores de índice de diversidade (Ilum. máx./ Ilum. mín.) entre 2 e 3
▲	Ruim	Valores de índice de diversidade (Ilum. máx./ Ilum. mín.) entre 3 e 4
◆	Muito ruim	Valores de índice de diversidade (Ilum. máx./ Ilum. mín.) maiores que 4

**Tabela 34** – Critério de avaliação da admissão de calor proporcionada por sistema de abertura analisado.

ADMISSÃO DE CALOR		
Símbolos	Conceitos	Critérios
●	Muito bom	Fator Solar menor que 0,20
■	Bom	Fator Solar entre 0,20 e 0,35
▲	Ruim	Fator Solar entre 0,35 e 0,50
◆	Muito ruim	Fator Solar maior que 0,50

**Tabela 35** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com vidro simples.

ABERTURA LATERAL COM VIDRO SIMPLES	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
9 às 10 h – céu claro	●	▲	◆
11 às 12 h – céu claro	◆	◆	◆
13 às 14 – céu claro	◆	◆	◆
15 às 16 – céu claro	▲	◆	◆
9 às 10 h – céu encoberto	◆	◆	-
11 às 12 h – céu encoberto	◆	◆	-
13 às 14 – céu encoberto	◆	◆	-
5 às 16 – céu encoberto	▲	◆	-

**Tabela 36** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com prateleira de luz espelhada.

ABERTURA LATERAL COM PRATELEIRA DE LUZ	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
9 às 10 h – céu claro	■	▲	▲
11 às 12 h – céu claro	●	■	■
13 às 14 – céu claro	▲	■	■
15 às 16 – céu claro	▲	■	▲
9 às 10 h – céu encoberto	●	▲	-
1 às 12 h – céu encoberto	●	▲	-
13 às 14 – céu encoberto	■	■	-
15 às 16 – céu encoberto	●	●	-

**Tabela 37** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com veneziana.

ABERTURA LATERAL COM VENEZIANA	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
--------------------------------	---------------------------	-----------------------------	-------------------

9 às 10 h – céu claro			
11 às 12 h – céu claro			
13 às 14 – céu claro			
15 às 16 – céu claro			
9 às 10 h – céu encoberto			-
1 às 12 h – céu encoberto			-
13 às 14 – céu encoberto			-
15 às 16 – céu encoberto			-

**Tabela 38** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura lateral com PCL.

ABERTURA LATERAL COM PCL	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
9 às 10 h – céu claro			
11 às 12 h – céu claro			
13 às 14 – céu claro			
15 às 16 – céu claro			
9 às 10 h – céu encoberto			-
1 às 12 h – céu encoberto			-
13 às 14 – céu encoberto			-
15 às 16 – céu encoberto			-

**Tabela 39** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso do sistema de abertura zenital com vidro simples.

ABERTURA ZENITAL COM VIDRO SIMPLES	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
9 às 10 h – céu claro			
11 às 12 h – céu claro			
13 às 14 – céu claro			
15 às 16 – céu claro			
9 às 10 h – céu encoberto			-
1 às 12 h – céu encoberto			-
13 às 14 – céu encoberto			-
15 às 16 – céu encoberto			-












**Tabela 40** – Avaliação do desempenho térmico e luminoso da abertura zenital com sistema de seleção angular.

ABERTURA ZENITAL COM SELEÇÃO ANGULAR	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
9 às 10 h – céu claro			
11 às 12 h – céu claro			
13 às 14 – céu claro			
15 às 16 – céu claro			
9 às 10 h – céu encoberto			-
1 às 12 h – céu encoberto			-
13 às 14 – céu encoberto			-
15 às 16 – céu encoberto			-

A tabela 41, mostra uma síntese da avaliação do desempenho térmico e luminoso de cada sistema de iluminação natural analisado, com os conceitos (expostos nas tabelas 34, 35, 36, 37, 38 e 39) que prevaleceram em cada item analisado.

**Tabela 41** – Avaliação dos sistemas de iluminação natural analisados, com os conceitos que prevaleceram em cada item analisado.

SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL	ILUMINÂNCIA MÉDIA INTERNA	DISTRIBUIÇÃO DE LUZ NATURAL	ADMISSÃO DE CALOR
Abertura lateral com vidro simples			
Abertura lateral com prateleira de luz espelhada			
Abertura lateral com veneziana			

Abertura lateral com Pannel cortado a laser	 		
Abertura zenital com vidro simples			
Abertura zenital com sistema de seleção angular	 		

Como pode-se observar, na avaliação da abertura lateral com vidro simples, prevalece o conceito “muito ruim” em todos os itens, por esse sistema proporcionar um dos maiores níveis de iluminância interna (admite a radiação solar direta), distribuir a luz de forma muito irregular e admitir grande quantidade de calor no ambiente.

Na avaliação da abertura lateral com prateleira de luz espelhada, prevalece o conceito “bom” em todos os itens, devido ao controle da radiação solar proporcionado pelo elemento horizontal espelhado, que divide a abertura em duas partes.

Assim, como no último sistema citado, a avaliação da abertura lateral com veneziana, também prevalece o conceito “bom” em todos os itens. Os seus elementos de controle filtram a radiação solar, reduzindo o excesso de luminosidade no ambiente, distribuindo a luz de forma mais regular e evitando ganhos térmicos excessivos.

Acredita-se que parte dessas avaliações possam ser extrapoladas para outros sistemas que pertençam ao mesmo grupo de caracterização (ver item 3.2), como é o caso:

- vidro simples com relação aos outros tipos de vidros, policarbonatos, acrílicos, dentre outros;
- da prateleira de luz com relação aos beirais, parapeitos, brises verticais, dentre outros;
- da veneziana com relação aos elementos vazados.

A avaliação da abertura lateral com PCL, não foi tão boa quanto a dos últimos dois sistemas citados. Nas medições realizadas, o sistema não controlou a luz de forma efetiva, ou seja, além de ter distribuído a luz de forma não uniforme (conceito “ruim”) ainda admitiu grande quantidade de luz (boa parte devido o acesso da radiação solar direta) e calor no ambiente (conceito “muito ruim”). Vale salientar, que esta avaliação foi realizada diante dos resultados adquiridos nas medições, onde não foram testados todos os ângulos de incidência da radiação solar.

Comparando o desempenho dos dois sistemas de iluminação zenital analisados, deparamo-nos com situações contrárias. O sistema zenital com vidro simples proporciona uma iluminação não uniforme, os maiores valores de iluminância horizontal (em todos os pontos de medição) e possui os maiores Fatores Solares (durante todos os horários de medição). Já o sistema com seleção angular, funciona de forma oposta, pois proporciona um dos menores índices de diversidade, os menores valores de iluminância horizontal (em todos os pontos de medição) e possui os menores valores de Fator Solar (durante todos os horários de medição).

Essa comparação mostra que, apesar de as aberturas zenitais serem caracterizadas por captarem excesso de luz e calor, quando utilizadas em conjunto com elementos de controle, bem dimensionados, são capazes de controlar a radiação solar de forma a redirecioná-la e introduzi-la em pequenas quantidades, suficiente para a iluminação do ambiente interno, evitando problemas com ofuscamentos e ganhos térmicos excessivos.



Assim, fica claro que os elementos de controle distribuem a luz de forma mais uniforme e equilibram o acesso de luz e calor no ambiente, possibilitando até que sistemas com abertura zenital sejam utilizados em locais de baixa latitude, ou seja, locais quentes com altos índices luminosidade externa, como é o caso do Nordeste do Brasil.

Neste trabalho, os melhores desempenhos térmicos e luminosos foram obtidos pelos três únicos sistemas que possuem elementos de controle responsáveis pelo sombreamento e redirecionamento da radiação solar direta, que são: as aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e a abertura zenital com sistema de seleção angular.

No entanto, no Nordeste, as aberturas, além de iluminar e controlar a radiação solar, devem contribuir para a ventilação natural do ambiente. Assim, aconselha-se o uso de sistemas que não obstruam demasiadamente a ventilação no ambiente e que possuam conceitos “bom” ou “muito bom”, com relação ao desempenho térmico e luminoso, como é o caso:

- da abertura lateral com prateleira de luz, caso não sejam utilizadas superfícies de separação fixas na parte baixa da janela;
- abertura lateral com veneziana, caso a abertura não seja composta com superfícies de separação fixas;
- abertura zenital com sistemas de seleção angular. Se a abertura não for composta por superfícies de separação fixas, ela pode funcionar, dependendo da orientação, como saída de ar quente ou captador de vento.

Uma outra boa alternativa para o local seria a utilização de sistemas onde a abertura lateral poderia ser dividida em duas partes:

- a parte superior da abertura seria responsável pela iluminação, podendo ser composta por vidros, acrílicos, painéis cortados a laser, painéis prismáticos, painéis com elementos halográficos e outros. Esses painéis utilizariam uma pequena parte da radiação solar para a iluminação natural e, devido as suas dimensões reduzidas, não aumentariam, de forma demasiada, o fluxo de calor para o ambiente;
- a parte inferior da abertura ficaria responsável pela integração visual entre o interior e o exterior e pela captação dos ventos.

É importante salientar que a geometria e as características de refletividade do dispositivo de iluminação natural e das superfícies internas, em conjunto com a orientação da abertura e com os ângulos de incidência da radiação solar, interferem significativamente no desempenho térmico e luminoso do sistema. Neste trabalho os dispositivos de iluminação natural foram projetados e testados apenas para fachada Norte, visto que essa é a orientação que mais favorece a utilização de dispositivos fixos para o sombreamento e redirecionamento da luz direta do sol, durante todo o ano.

## 4.4. CONCLUSÃO

As análises experimentais realizadas neste capítulo permitiram a formulação das seguintes conclusões:

- ® A fotometria de modelos em escala mostrou-se ser bastante apropriada como uma ferramenta de prognóstico para sistemas de aberturas inovativos que envolvem a luz solar direta.
- ® O Radiômetro de Abertura consiste numa ferramenta promissora para estimar o ganho térmico solar dos sistemas de abertura em maquetes. A sua habilidade de integrar a radiação incidente sobre a sua área de superfície de entrada faz dele um aparato experimental, adequado para lidar com a iluminação natural sob condições de céu não uniforme.
- ® A proposta metodológica, descrita no capítulo 3, aparenta ser muito apropriada para analisar, em conjunto, o desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol.
- ® O sol pode apresentar-se como uma fonte de luz suplementar, caso seja controlado e introduzido em pequenas quantidades, podendo proporcionar ambientes térmica e visualmente confortáveis, além de energeticamente eficientes.
- ® Quando adequadamente projetados, alguns dispositivos de iluminação natural, que utilizam a luz direta do sol, como é o caso do PCL, podem promover iluminação mais uniforme do que o vidro simples, com melhoramentos no nível de iluminância interna em áreas mais afastadas das janelas.
- ® Uma outra parte dos dispositivos de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol não contribui significativamente para o melhoramento do nível da iluminância interna, como é o caso das aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e da abertura zenital com sistema de seleção angular, mas, em compensação, proporciona iluminação natural bem mais uniforme e com ganhos térmicos bastante reduzidos.

Vale salientar, que em alguns casos a redução do nível de iluminância interna é vista de forma positiva, visto que os sistemas de aberturas com vidro simples captam excesso de luminosidade, podendo causar desconforto e fadiga visual.

- ® A geometria do sistema de iluminação natural e da superfície interna, em conjunto com as características de refletividade das superfícies são importantes parâmetros para a maior exploração da técnica de luz solar direta, uma vez que a concepção de redistribuição da luz natural está baseada, geralmente, em um refletor interno secundário (Ex: Teto ou partes superiores das paredes).

Todo o conhecimento gerado no processo de elaboração deste trabalho constituiu subsídios para a elaboração da síntese final e diretrizes de projeto apresentadas no item 4.2.3.

Algumas diretrizes, foram extrapoladas para sistemas que possuam características em comum com os sistemas estudados e contribuem para a ampliação das informações técnicas existentes, relevantes ao processo de projeto de sistemas de iluminação natural.

---

## Capítulo 5

---

# Conclusões e Recomendações

<b>5 Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>122</b>
<b>5.1 Introdução.....</b>	<b>122</b>
<b>5.2 Principais Conclusões do Trabalho.....</b>	<b>122</b>
<b>5.3 Limitações do Trabalho.....</b>	<b>126</b>
<b>5.4. Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>126</b>
<b>5.5. Conclusão.....</b>	<b>127</b>

## 5.1. INTRODUÇÃO

De acordo com a literatura revista e com os resultados obtidos neste trabalho, percebe-se que os sistemas de iluminação estudados têm grande potencial para conservação de energia nas edificações, uma vez que podem reavaliar o uso da iluminação artificial, proporcionando luz natural durante boa parte do dia.

Os sistemas que utilizam o sol como uma fonte de luz, podem proporcionar iluminação natural mais uniforme do que os sistemas convencionais, gerando ambientes mais agradáveis e eficientes energeticamente.

Apesar do grande benefício proporcionado pela luz natural, as vantagens e desvantagens do ganho de calor solar têm significado crucial na aplicabilidade dos sistemas inovativos de abertura, seja na forma de dispositivos de sombreamento ou redirecionamento da luz direta do sol.

A metodologia utilizada nesse trabalho, mostrou-se adequada para avaliar os ganhos térmicos e luminosos de qualquer sistema de abertura. A grande relevância dessa metodologia é que a partir do seu uso, pode-se ampliar o conhecimento a respeito de dispositivos complexos de iluminação natural, ainda não disponível na literatura, gerando diretrizes de projeto mais específicas.

## 5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO

Certamente, os aspectos mais importantes do presente estudo são a comprovação da eficiência da metodologia utilizada e a síntese final do desempenho térmico e luminoso de cada sistema de iluminação natural analisado, gerada a partir dos dados experimentais.

Ao final do experimento, foram obtidas características térmicas e luminosas dos sistemas: abertura lateral com vidro simples, abertura lateral com veneziana parcialmente espelhada, abertura lateral com prateleira de luz espelhada, abertura lateral com painel cortado a laser, abertura zenital com vidro simples e abertura zenital com sistema de seleção angular.

Esses sistemas foram escolhidos a partir de alguns critérios expostos no item 3.2.1 da metodologia. No entanto, sabe-se que existe uma série de possibilidades de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol, cada um, com suas vantagens, desvantagens e adequados, ou não, a uma determinada situação. Neste trabalho, esses sistemas (item 2.6 da Bibliografia) foram classificados de acordo com o esquema abaixo:

### ➤ SISTEMAS ATIVOS

- ® Dutos de luz
- ® Sistema de prismas motorizados
- ® Venezianas com rastreamento solar

® Valra

➤ **SISTEMAS PASSIVOS**

® **Sistemas com refletores (difusos) de luz**

- > Prateleiras de luz
- > Sistemas de iluminação zenital com refletores de luz

® **Sistemas de refração da luz**

- > **Sistemas prismáticos**
- > **Painéis prismáticos que redirecionam a luz direta do sol**
- > **Painéis prismáticos que excluem a luz direta do sol**
- > **Painéis cortados a laser (PCL)**
  - Abertura lateral composta com painéis cortados a laser
  - Abertura zenital composta com painéis cortados a laser
- > **Sistemas de reflexão interna total**

® **Sistemas espelhados**

- > **Venezianas espelhadas**
- > **Prateleira de luz espelhada e prateleira de luz curvada e revestida com película reflexiva**
- > **Parapeitos e conchas reflexivas**
- > **Forro iluminante**
- > **Abertura zenital com duto de luz espelhado**

® **Sistemas de lentes**

® **Elementos halográficos**

® **Fibra ótica**

Os sistemas apresentados, no item 2.6 da Revisão Bibliográfica, foram indicados como uma alternativa para melhorar o conforto e a eficiência energética na edificação, principalmente em regiões quentes onde o conflito entre a luz e o calor é mais intenso, desde que controlem e introduzam o sol em pequenas quantidades suficientes para a iluminação natural. O controle da luz direta do sol também pode ser uma solução para o problema de introdução da luz natural em espaços internos profundos e também pode contribuir para o melhoramento do balanço do brilho do espaço, relativo à vista da janela.

Entretanto, pouco trabalho de pesquisa tem sido feito para o desenvolvimento de recomendações de projeto, a partir do fornecimento da admissão efetiva da luz natural e calor solar destas novas estratégias de aberturas. Assim, neste trabalho, foi proposta uma metodologia baseada no uso de modelos em escala que, apesar da dependência das condições externas, mostraram-se bastante apropriados como ferramentas de prognóstico térmico e luminoso para sistemas de aberturas inovativos, que envolvem a luz do sol direta.

No capítulo 3, correspondente a metodologia, foi exposto todo o procedimento metodológico utilizado. Resumidamente pode-se dizer que a metodologia consiste em uma investigação experimental, através de modelos em escala e sob condições de céu reais. O experimento foi dividido em dois grupos de medições:

- 1- medições dos níveis de iluminância, através de fotocélulas nos modelos em escala reduzida;
- 2- medições do fluxo de calor, que atravessa os mesmos sistemas inseridos na maquete, através do uso do Radiômetro de Abertura.

Para a determinação dos níveis de iluminância horizontal, foram utilizadas seis maquetes com ambientes idênticos, nas quais variam apenas o tipo de abertura e de sistema de iluminação natural. Em seguida, foram realizadas medições do fluxo de calor transmitido através das aberturas do Radiômetro, configuradas com os mesmos sistemas utilizados para as medições de iluminância.

Simultaneamente à aquisição dos dados através do fluxímetro, um piranômetro mediu a incidência de radiação solar direta na abertura em  $W/m^2$ , para a determinação do Fator Solar (FS) do sistema de iluminação natural.

Para possibilitar a avaliação da variabilidade da luz e da radiação solar no decorrer do dia, foram feitas quatro medições durante os seguintes horários: 9 às 10 h; 11 às 12 h; 13 às 14 h e 15 às 16h.

No capítulo 4, correspondente aos Resultados, o desempenho dos sistemas foi discutido de forma comparativa. Inicialmente, as análises térmicas e luminosas foram realizadas separadamente; em seguida, foi realizada uma síntese final que corresponde ao cruzamento das análises e dos dados térmicos e luminosos.

Abaixo, nas tabelas 42, 43, 44 e 45 seguem as sínteses dos resultados quantitativos obtidos nas medições luminosas e térmicas, respectivamente.

**TABELA 42** – Iluminância média horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu claro.

<b>Média das iluminâncias horizontais internas encontras nos três dias de medição (lux).</b>						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz espelhada	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	1038	908	457	923	5295	613
11 às 12 h	3562	1678	947	3079	6579	1839
13 às 14 h	10284	2464	1591	13919	13842	1996
15 às 16 h	2891	2187	1428	2144	3731	1139

**TABELA 43** – Iluminância média horizontal interna, encontrados nos três dias de medição, sob condição de céu encoberto.

<b>Média das iluminâncias horizontais internas encontras nos três dias de medição (lux).</b>						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	3459	1809	1141	1625	3440	495
11 às 12 h	3562	1458	918	3079	6152	895
13 às 14 h	3274	944	577	1624	3101	600
15 às 16 h	2598	1346	860	1242	3116	431

**TABELA 44** – Média dos valores de Fator Solar dos sistemas de iluminação natural, encontrados nos três dias e nos quatro horários de medição.

<b>Fatores Solares dos sistema de iluminação natural analisados.</b>						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	0.55	0.38	0.33	0.74	0.85	0.05
11 às 12 h	0.50	0.30	0.19	0.54	0.90	0.06
13 às 14 h	0.52	0.34	0.20	0.51	0.86	0.06
15 às 16 h	0.58	0.49	0.35	0.63	0.73	0.04

**TABELA 45** – Valores do SSLE\* para cada sistema de iluminação natural estudado, retirando os horários onde ocorreram a maior incidência de radiação solar direta no sensor.

<b>SSLE* lm/W</b>						
Horários das medições	Abertura lateral com vidro simples	Abertura lateral com prateleira de luz	Abertura lateral com veneziana	Abertura lateral com PCL	Abertura zenital com vidro simples	Abertura zenital com sistema de seleção angular
9 às 10 h	165,30	201,63	132,98	106,44	90,86	169,52
11 às 12 h	388,12	283,95	283,09	297,23	102,12	474,51
13 às 14 h	-	476,67	366,43	-	-	532,61
15 às 16 h	-	496,87	405,81	342,93	108,69	543,64
<b>Média</b>	276,71	364,78	297,08	248,87	100,56	430,07

Para caracterizar a performance térmica e luminosa dos sistemas de iluminação natural selecionados, foi realizada uma série de análises a partir dos seguintes itens:

- admissão de luz e calor;
- capacidade de distribuição de luz natural;
- comportamento frente à variação da iluminância externa, diferentes tipos de céu e ângulos de incidência da radiação solar.

Os sistemas de abertura lateral e zenital com vidro simples, únicos que utilizam apenas o vidro simples como elemento de passagem, foram utilizados como referência para a comparação entre os sistemas.

Os dados e as análises obtidas a partir do experimento indicaram que:

- ® A fotometria de modelos em escala mostrou-se ser bastante apropriada como uma ferramenta de prognóstico para sistemas de aberturas inovativos que envolvem a luz solar direta.
- ® O Radiômetro de Abertura consiste numa ferramenta promissora para estimar o ganho térmico solar dos sistemas de abertura em maquetes. A sua habilidade de integrar a radiação incidente sobre a sua área de superfície de entrada faz dele um aparato experimental, adequado para lidar com a iluminação natural sob condições de céu não uniforme.



- ® A proposta metodológica, descrita no capítulo 3, aparenta ser muito apropriada para analisar, em conjunto, o desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol.
- ® A geometria do sistema de iluminação natural e da superfície interna, em conjunto com as características de refletividade das superfícies são importantes parâmetros para a maior exploração da técnica de luz solar direta, uma vez que a concepção de redistribuição de luz natural está baseada, geralmente, em um refletor interno secundário (Ex: teto ou partes superiores das paredes).
- ® A variação de iluminância interna é influenciada, não só pela variação da iluminância externa, mas também e, principalmente, pela disponibilidade de luz do sol vista através da abertura.
- ® Os sistemas de aberturas mais simples, ou seja, aqueles que não possuem elementos de controle da radiação solar (abertura lateral e zenital com vidro simples), distribuem a luz de forma irregular e admitem excesso de luminosidade no ambiente, podendo causar ofuscamento, superaquecimento nos locais próximos da abertura, um aumento significativo no consumo de energia na edificação.
- ® Sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol, quando bem dimensionados, podem filtrar a radiação solar, proporcionando iluminação com níveis de iluminância adequado, distribuição da luz mais uniforme e ganhos térmicos reduzidos. Dos sistemas estudados, as aberturas laterais com prateleira de luz espelhada, com veneziana e da abertura zenital com sistema de seleção angular, obtiveram os melhores desempenhos térmicos e luminosos, uma vez que promoveram, na maior parte das medições:
  - níveis de iluminância entre 500 e 2.000 lux, valores considerados ideais para iluminar salas de aula, salas de leitura, salas de desenho, escritórios, lojas, entre outros;
  - distribuição de luz mais uniforme, com índices de diversidade variando entre 2 e 3, do que a abertura lateral com vidro simples, cujo os índices de diversidade foram maiores que 4, (quanto maior o índice de diversidade pior a distribuição de luz no ambiente);
  - Fatores Solares abaixo de 0,35, menores do que os apresentados pelos outros três sistemas analisados.
- ® Quando adequadamente projetados, alguns dispositivos de iluminação natural, que utilizam a luz direta do sol, como é o caso do PCL, podem promover iluminação mais uniforme do que o vidro simples, com melhoramentos no nível de iluminância interna em áreas mais afastadas das janelas. No entanto, apesar dessas qualidades, o PCL, no experimento, não obteve um desempenho

térmico e luminoso tão bom quanto os dos outros três sistemas citados anteriormente, uma vez que admitiu excesso de:

- luz - boa parte devido o acesso da radiação solar direta;
- calor - com Fator Solar variando entre 0,51 e 0,74.

- ® Os elementos de controle distribuem a luz de for mais uniforme e equilibram o acesso de luz e calor no ambiente, possibilitando até que sistemas com abertura zenital sejam utilizados em locais de baixa latitude, ou seja, locais quentes com altos índices luminosidade externa, como é o caso do Nordeste do Brasil.
- ® Uma boa alternativa para a iluminação de ambientes em locais de baixa latitude é a integração da luz solar direta com o projeto das aberturas, desde que a luz direta seja controlada e inserida em pequenas proporções no ambiente.

Assim, a partir do trabalho apresentado, pode-se demonstrar como algumas técnicas de medições podem ser efetivamente utilizadas para avaliar ou para realizar uma análise térmica luminosa de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol. Além disso, de acordo com os resultados apresentados, pode-se comprovar que o sol pode ser utilizado como uma fonte de luz suplementar, caso controlado por sistemas de iluminação natural bem projetados, uma vez que esses sistemas são capazes de introduzir a luz do sol em pequenas quantidades, promovendo ambientes térmica e luminosamente confortáveis.

### 5.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Como a metodologia utilizada, baseou-se na realização de uma investigação experimental sob condições de céu reais, deve-se considerar que as medições foram sujeitas às grandes variações da radiação direta e difusa durante o dia. Para a realização de uma análise quantitativa mais precisa dos dados, seria necessário a realização de um maior números de medições térmicas e luminosas.

Também vale salientar, que cada resultado, térmico (Fator Solar) e luminoso (iluminância horizontal interna) correspondem a uma determinado dia, hora e a um ângulo de incidência exato, uma vez que os sistemas de iluminação natural não foram expostos a todas as possibilidades de orientações e ângulos de incidência da radiação solar. Estas limitações impossibilitaram a análise do desempenho dos sistemas durante o ano e a geração de diretrizes de projetos mais abrangentes.

## 5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudos com modelos em escala, para avaliar o desempenho térmico e luminoso dos sistemas de iluminação natural, durante todo o ano, em diferentes orientações.
- Elaborar base de dados para diversos sistemas de iluminação sob a incidência de diferentes orientações e ângulos de incidência da radiação solar.
- Avaliar precisamente a sensibilidade do Radiômetro de Abertura com relação às variáveis climáticas.
- Avaliar mais detalhadamente a dependência do Fator Solar ao ângulo de incidência de radiação solar, em diversos sistemas de iluminação natural.
- Elaborar base de dados para sistemas de iluminação natural contendo Fatores Solares para diversos ângulos de incidência da radiação solar.

## 5.5 CONCLUSÃO

O sistema de abertura é indiscutivelmente um dos componentes mais sensíveis da edificação devido ao seu contato físico com o ambiente externo, sendo peça fundamental para a obtenção do conforto térmico e luminoso nas edificações.

Uma das suas funções é admitir a entrada da luz natural enquanto controla os ganhos e perdas de calor. O balanço correto dos requerimentos térmicos e luminosos reduzem a necessidade do uso de equipamentos elétricos, e ainda ajudam a promover uma arquitetura mais adequada ao clima do local e em harmonia com a natureza.

O presente estudo buscou contribuir para a ampliação do conhecimento a respeito de sistemas de abertura, principalmente a respeito do conflito existente entre a admissão de luz e calor. Os resultados obtidos mostram que a luz direta do sol pode ser inteligentemente aproveitada, por arquitetos e engenheiros para equilibrar esse conflito.

Assim, espera-se que o conhecimento gerado nessa dissertação, ao ser publicado, desperte a atenção de profissionais da área para as potencialidades dos sistemas inovativos, que utilizam o sol como fonte de iluminação natural, como também para a necessidade de realização de novas pesquisas que auxiliem arquitetos e engenheiro a conceberem projetos cada vez mais vinculados as características climáticas e ao conforto humano.

## Referência Bibliográfica

- ABNT (1990). **Iluminância de Interiores, NB-57**. Rio de Janeiro: ABNT.
- ARASTEH, D.; JONSON, R.; SELKOWITZ, S. & CONNELL, D., (1985). **Cooling Energy and Cost Savings with Daylighting in a Hot and Humid Climate**. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, LBL-19734.
- ASHRAE, (1989). **Chapter 27: Fenestration**. In: ASHRAE (Ed.), *ASHAE Handbook – Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- AIZLEWOOD, M. E., (1993). **Innovative Daylighting Systems: An Experimental evaluation**. In: *International Journal of Lighting Research and Technology*. Great Britain: The Chartered Institution of Building Services Engineers, v. 25, n. 4. pp. 141-152.
- AL-SHAREEF, A. M.; OLDHAM, D. J.; CARTER, D. J., (2001). **A Computer Model for Predicting the Daylight Performance of Complex Parallel Shading Systems**. *Building and Environment*. Vol 36 (5), pp. 605-618.
- BAKER N.; FANCHIOTTI A.; STREEMERS K., (1993) **Daylighting in Architecture**. London James & James.
- BAUMAN, F. S.; et al, (1986). **An Integrating Window Pyranometer for Beam daylighting Measurements in Scale-Model Buildings**. *ASHRAE Transactions*, v. 92 (part 1A). pp. 486-493.
- BEDFORD, T.; (1948). **Basic Principles of Ventilation and Heating**. Londres.
- BELTRÁN, L. O., LEE, E. S., SELKOWITZ, S. E., (1997) **Advanced Optical Daylighting Systems: Light Shelves and Light Pipes In: Journal of Illuminating Engineering Society**. USA: Engineering Society of North America, v. 26, n. 2. pp 91-106.
- BELTRÁN, L. O., PAPAMICHAEL, K. M., SELKOWITZ, S. E., (1994). **The Design Evolution of Three Advanced Daylighting Systems: Light Shelves, Light Pipes and Skylights**. In: Lawrence Berkeley Laboratory – University of California.
- BREITFUSS, W. (1984). **Daylight Guide System with Integral Sun Protection**. In : Proc. Lichttechnische Gemeinschaftstagung Licht'84 Monnheim.
- BENÉVOLO, L., (1976). **Introdução à Arquitetura**. São Paulo: Editora Mestre Jou.
- BITTENCOURT, L.S., (1993). **Ventilation as a Cooling Resource For Warm-Humid Climates: An Investigation on Perforated Block Wall Geometry to Improve Ventilation Inside Low-Rise Building**. Tese (Doutorado) Architectural Association Graduate School, Environment and Energy Studies Programme, London.
- BOREL, J. C., (1962). **La protection des Baies Vitrees Contre le Soleil**. *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Batiment*. CSTB, v. 55. 437 p.
- BORG, Nils., (1994). **A Systems Approach to Remote Light Sources**. In: IAEEL – Suíça: International Association For Energy-Efficient Lighting. pp. 6-7.
- BOUBEKRI, Mohamed., (1999). **An Experimental Evaluation of the Efficiency of Prismatic Glazing**. In: *Anais do PLEA'99*, Brisbane, v. 2. pp. 583-588.
- BRYAN, H. J., (1990) **An Overview of Standard 90.1 – Daylighting**. *ASHRAE Journal*, jan/90. pp.26.
- CAIRNS, E. J. & SELKOWITZ, S. E., (1988). **Window and Lighting Program**. University of California, Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-26587.

- CARMODY, J., SELKOWITZ, S., HERSCHONG, L. (1996) **Residential Windows, a guide to new technologies and energy performance**, W.W. Norton & Company, New York.
- CHEUNG, K. P., CHU, C. Y., et al., (1996). **A light Duty Universal Direct Sunlighting Heliodon**. In: Architectural Sciencereview, v. 39 n. 4. Australian: University of Sidney Printing Service pp. 187-191
- CIBSE, (1984). **Code for Interior Lighting**. London: The Chatered Institution of Building Services.
- CIBSE, (1987). **Applications Manual: Window Design**. The Chartered Institution of Building.
- CIBSE, (1994). **Code for Interior Lighting**. London: The Chatered Institution of Building Services.
- COOK, J., (1989). **The State of Passive Cooling Research**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- COURRET, G., SCARTEZZINI, J., et al., (1998). **Design and Assessment of an Anidoloc Light-Duct**. In: Energy and Building. New York: Elsevier, v. 28 n. 1. pp 79-99.
- COWLING I. R. & VEEVERS P., (1990) **The Design and Performance of a Permanently Mounted Daylighting Device**. In: Architectural Sciencereview. Australian: University of Sidney Printing Service, v. 33 n. 4. pp. 97-103.
- CRITTEN, D. L., (1986). **Light Enhancement in Greenhouses using Prismatic Refractors in a Venetian Blind Assembly**. In: Solar Energy. USA: Pergamon, v. 37, n. 4. pp 313- 317.
- DAVENPORT, M. R. & NALL, D. H., (1983). **The Correlation of Measured Interior Daylight with Calculed Solar Gain**. In: Proc. International Daylighting Conference, Phoenix, USA, pp. 109-113.
- DOGNIAUX, R., (1987). **Daylighting in Architecture: Factor in the Quality of Live**. In: Proc. European Conference on Architecture, Munich Germany, pp. 661-66.
- DUTRA, Luciano, (1994). **Uma Metodologia para Determinação do Fator Solar Desejável em Aberturas**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, CTC, UFSC.
- EDMONDS, I. R. , COWLING, I. R., MEARA, L. A. & WHEELER, B., (1983). **The Design and Performance of Ideal Solar Concentrators Based on the Prism-assisted Cylindrical Reflector** In: Solar Energy. Great Britain: Pergamon, v. 30, n. pp 537-543.
- EDMONDS, I. R., MOORE, G. I., et al., (1995) **Daylighting Enhancement with Light Pipes Coupled to Laser-cut Light-Deflecting Panels**. In: International journal of Lighting Research and Technology. Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 27, n. 1. pp. 27-35.
- EDMONDS, I. R., REPPEL, J., & JARDINE, P. (1997) **Extractors and Emitters for Light Distribution from Hollow Light Guide**. In: International journal of Lighting Research and Technology. : Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 29, n. 1. pp. 23-32.
- EVASNS, J. M.; SCHILLERS, S., (1991). **Disenõ Bioambiental Y Arquitetura Solar**. Centro de Investigación "Habitat y Energia", Buenos Aires, Argentina.
- FONTOYNONT, M., (1999). **Daylight Performance of buildings**. ENTPE, European Commission Directorate General XII for Science. Lyons, France: James & James.
- FONSECA M. Ribeiro da, (1993). **Desenho Solar**. São Paulo: Projeto.
- FRY, Maxwell & DREW, Jane, (1982). **Tropical Architecture in Dry and Humid Zones**. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company.
- GIVONI, B., (1982). **Man, Climate and Architecture**. Londres: Aplllied Science Publishers Ltd.
- GOITIA, Fernando Chueca, (1995). **História Geral da Arte - Arquitetura I**. Espanha: Ediciones Del Prado.
- GÜTHS, S., (1994). **Anémomètre a effet Peltier et fluxmètre thermique - conception et réalisation - application à l'étude de la convection naturelle**". Tése de Doutorado. Université d'Artois (França).

- HAYMAN, S. (1990). **Fibre-optic Photocells for Daylighting Model Studies**. In: Building end Enviroment. Great Britain: Pergamon Press, v. 25, n. 4. pp.333-337.
- HEERWAGEN, J. H., (1990). **The Psychological Aspects of Windows and Window Design**. In: Proc. Environmental Design Research Association Conference (EDRA), Illinois, USA. pp, 269-280.
- HOLMES, J. G., (1988). **Light Reflection by Prismatic Sheets**. In: **International journal of Lighting Research and Technology**. Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 20, n. 3. pp115-117.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P. & LONGMORE, J., (1966). **Daylighting**. London: Heinemann.
- HOWARD, T. C.; PLACE, W.; ANDERSON B. & COUTIEERS P., (1986). **Variable-Area, Light-Reflecting Assemblies (VALRA)**. In: Proc. 2<sup>a</sup> Internetalional Daylighting Conference, Long Beach, USA. pp. 306-309.
- KHEIRA, T., (1991) **The Integration of View, Window Design and Sading devices**. PhD, Thesis, University of Sheffield, School of Achitectoral Studies.
- KIMURA, K., (1971). **Cooling Load Caused by Solar Radiation from Glass Windows**. Memoirs of the Scool of Science & Engineering of Waseda University, v. 35. 36p.
- KLEMS J.; SELKOWITZ, S.; HOROWITZ, S., (1982). **A Mobile Facility for Measuring Net Energy Performance of Windows an Skylights**. In: Proc. 3<sup>rd</sup> International Symposium on CIB W-67 "Energy Conservation in the Built Environment", Dublin, Ireland, v. III.
- KOENIGSBERGER, O., INGERSOLL, T. G., MAYHEW, A., E SKOKOLAY, S., (1997). **Manual of Tropical Housing**. Part One: Climatic Design. Londres: Logman group Ltd.
- KRIBUS, A., ZIK, O., KARNI, J., (2000) **Optical Fibers and Power Generation**. In: Solar Energy. Great Britain: Pergamon, v. 68, n. 5. pp. 405-416.
- LAM, William M. C.(1986). **Sunlighting as formgiver for architecture**. Nova York: Van Nostrand Reinold Company.
- LAMBERTS R.; DUTRA, L, PEREIRA, F.(1997) **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores. pp.187.
- LEMONS T.M., (1983). **Lenses with improve skylight performance** .In:Interior daylighting conference. Washington: AIA. pp. 255-260.
- LI-COR, (1990). **LI-1000 Datalogger – Instruction Manual, LI-COR inc**. Publication n. 8510-0051, Lincoln, USA.
- LI-COR, (1991). **LI-COR Radiation Sensors– Instruction Manual, LI-COR inc**. Publication n. 8609-56, Lincoln, USA.
- LITTLEFAIR, Paul J., (1990). **Innovative Daylighting: Review of Systems and Evaluating Methods**. In: **International journal of Lighting Research and Technology**. Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 22, n. 1. pp 1-17.
- LITTLEFAIR, Paul J., (1995). **Light Shelves: Computer Assessment of Daylighting Performance**. In: **International journal of Lighting Research and Technology**. Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 27, n. 2. pp 79-91.
- LOVELAND, J. & BROW, J., (1987). **Chapter II: Modeling**. In: M. Schiler (Ed.), **Simulating Daylight with Architectural Models**, Daylighting Network of North America/University of Southern California, Los Angeles, USA. pp. 17-43.
- LYNES, J. A. (1968). **A Principles of Natural Lighting**. Nova York: Elsevier Publishing Company.
- MANSEL, G., (1976). **Anatomia da Arquitetura**. : Hong Cong: Hamlyn Publishing Group Limited.
- McCLUNEY, R., (1991). **The Death of the Shading Coefficient?** ASHRAE Journal, March/91. pp. 36-45.

- McCLUNEY, W. R., (1993). **The Benefits of Using Window Shades**. ASHRAE Journal, November/93. Pp. 20-26.
- MILLBANK, N. O. & HARRINGTON-LYNN, J., (1974). **Thermal Response and the Admittance Procedure**. Building Research Establishment, CP 61/74.
- MOECK, M. (1998). **On Daylight Quality and Quantity and Its Application to Advanced Daylight Systems**. In: Journal of the Illuminating Engineering Society. New York: Hanover, v. 27, n. 1. pp. 3-21.
- MOORE, Fuller, (1991). **Concepts and Practice of Architectural Daylighting**. USA: Van Nostrand Reinhold.
- NE'EMAN, E., (1974) **Visual Aspects of Sunlighting in Buildings**. In: Lighting Research & Technology, v. 6(3). pp. 159-164.
- OAKLEY, G.; RIFFAT S. B.; SHAO, L., (2000). **Daylight Performance of Lightpipes**. In: Solar Energy, v. 69(2), pp. 889-98.
- OLGYAY, V. & OLGAY A., (1963). **Solar Control and Shading Devices**. Princeton: University Press.
- OLIVEIRA, Fernando Márcio, (1998). **A prática Projetual de Janelas como Recurso de Controle da Ventilação em Ambientes Internos para a Região de Maceió**. Dissertação de Mestrado pela escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PARMELEE, G. H.; et al, (1948). **Measurements of Solar Heat Transmission Through Flat Glass**. Transactions of ASHVE, v. 54. pp. 165-186.
- PEREIRA, F. O. R., (1992). **Luminous and Thermal Performance of Windows Shading And Sunlighting Reflecting Devices**. PhD Thesis, School of Architectural Studies, University of Sheffield.
- PEREIRA, F. O. R., (1993). **Luz Solar Direta: Tecnologia para Melhoria do Ambiente Lumínico e Economia de Energia na Edificação**. In: Anais do II Encontro de Conforto no Ambiente Construído, ANTAC-SOBRA-ABERGO, Florianópolis / Santa Catarina. pp. 257-267.
- PEREIRA, F. O. R., (1994). **Uma Metodologia para Indicações de Ocupação do Ambiente Urbano - controle da obstrução da abóbada celeste**. Departamento de Arquitetura e Urbanismo , UFSC, Florianópolis.
- PEREIRA, F. O. R., (1995). **Apostila do Curso de Iluminação Natural no Ambiente Construído**. Curso realizado no III Encontro Nacional e I Encontro Latino do Ambiente Construído, ANTAC, Gramado / Rio Grande do Sul.
- PETHERBRIDGE, (1965). **Transmission Characteristics of Window Glasses and Sun Control**. In: Proc. CIE Intersessional Conference: "Sunlight in Buildings" Bouwcentrum International, Nwcastle-upon-Tyne. pp. 183-198.
- PLACE, W.; FONTOYNONT, M.; CONNER, C.; KAMMERUD, R; ANDERSON, B.; BAUMAN, F.; CARROLL, W.; HOWARD, T.; METROL, A.; & WEBSTER, T., (1984). **The Predicted Impact of Roof Aperture Design on in Energy Performance of Office Buildings**. Energy and Buildings, Vol. 6, pp.361-373.
- ROBBINS, C. L., (1986). **Daylighting: Design and Analysis**. Nova York: Van Nostran Reinhold Co.
- ROSENFELD, A. H. & SELKOWITZ, S. E., (1977). **Beam Daylighting: an Alternative Illumination Technique**. IES Lighting Review , v. 43 (1). pp. 24-26.
- RUCK, N. C., (1985) **Beaming Daylight into Deep Rooms**. In: Batiment International Building. United Kingdom: Martins Close Research & Practice, v. 13, n. 3. pp.144- 147.
- RUCK, N. C., SMITH S. C. J., (1988). **The Passive Daylighting of Building Interiors**. In: Architectural Sciencereview. Australian: University of Sidney Printing Service, v. 31, n. 3. pp. 87-98.
- SARAJI, R. M. N., MISTRICK, R. G. & MODEST, M. F., (1996). **Modeling Light Transfer Through Optical Fibers for Illumination Applications**. In: Journal of Illuminating Engineering Society. USA: Engineering Society of North America, v. 25, n. 2. pp. 128-138.

- SELKOWITZ, S. E. & GRIFFITH, J. W., (1986). **Energy Evaluation of Natural Illumination by Direct Sunlight with Reflective Louvers**. In: Proc. ISES "Congress Solar World Forum", Brighton, UK. pp. 2293-2297.
- SHAO, L., ELMUALIM, A. A. & YOHANNES, I. (1998) **Mirror Lightpipes: Daylighting Performance en Real buildings**. In: International journal of Lighting Research and Technology. : Great Britain: The Ghartered Intitution of Building Services Engineers, v. 30, n. 1. pp. 37-44.
- SMART, M. & BALLINGER, J. A., (1983). **Tracking Mirror Beam Sunlighting for deep Interior Spaces**. In: Solar Energy. Great Britain: Pergamon, v. 30, n. 6. pp. 527-536.
- SOTERAS, Rafael Mur, (1985 **Geometria e Iluminação Natural – Introducció de la Iluminació Natural en el Processo de Control**). **Gráfico del Desenõ**. Tesis Doctoral, ETSAB, UPC, Barcelona, Espanã.
- SOUZA, Roberta V. G.; (1997). **Iluminação Natural em edificações: Cálculo de Iluminâncias Internas – Desenvolvimento de Ferramenta Simplificada**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina.
- SZALABO, Ladislao, (1998). **A Luz Natural na Arquitetura**. In: Revista Projeto, n. 227.
- SZOKOLAY, S. V., (1987). **Thermal Design of Building**. RAA Education Division, Red Hill, Australia.
- VILD, D. J., (1974). **Solar Heat Gain Factors and Shading Coefficients**. ASHRAE Journal, v. 6. pp. 47-50.
- WHITEHEAD, L. A., (1998a). **New Simplified Design Procedures for Prism Light Guide Luminaires**. In: Journal of Illuminating Engineering Society. USA: Engineering Society of North America, v. 27, n. 2. pp. 21-27.
- WHITEHEAD, L. A. & DANALDSON, M., (1998b) **Investigation of light Distribution with an Annular Lens Light Guide**. In: Journal of Illuminating Engineering Society. USA: Engineering Society of North America, v. 27, n. 2. pp. 3-12.
- WHITEHEAD, L. A. & HOFFMAN, K, (1998c). **Method for Estimating the Efficiency of Prism Light Guide Luminaires**. In: Journal of Illuminating Engineering Society. USA: Engineering Society of North America, v. 27, n.2. pp. 13-20.
- WILCOX, A. I. A., CUNNINGHAM, G., (1986). **Strategies for Direct Beam Daylighting**. In: **Sunworld**. California: SunWorld, v.10, n.1. pp. 11-12.
- [www.boin-solar.de](http://www.boin-solar.de), jul/2001.
- [www.frdge.arch.uwa.edu.au](http://www.frdge.arch.uwa.edu.au), jul/2001.
- [www.arch.hku.hk](http://www.arch.hku.hk), jul/2001.
- [www.windows.lbl.gov](http://www.windows.lbl.gov), jul/2001.
- [www.ornl.gov](http://www.ornl.gov), jul/2001.
- [www.qut.edu.au](http://www.qut.edu.au), jul/2001